

ADRIANO LUIZ CENI RIESEMBERG

**AVALIAÇÃO DO AMBIENTE RADICULAR DE UM
LATOSSOLO VERMELHO ESCURO (TEXTURA
ARGILOSA) APÓS TRÊS ANOS SOB
PLANTIO DIRETO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Gláucio Roloff, Ph. D.

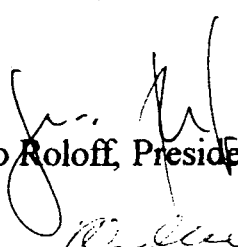
CURITIBA
1994

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO
"MESTRADO"**

P A R E C E R

Os Membros da Comissão Examinadora, designados pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo", para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **ADRIANO LUIZ CENI RIESEMBERG**, com o título: **"AVALIAÇÃO DO AMBIENTE RADICULAR DE UM LATOSSOLO VERMELHO ESCURO (TEXTURA ARGILOSA) APÓS TRÊS ANOS SOB PLANTIO DIRETO"** para obtenção do grau de Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo" do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haver analisado o referido trabalho e argüido o candidato, são de Parecer pela **"APROVAÇÃO"** da Dissertação com o conceito **"A"** completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de **Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo"**.

Secretaria do Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo", em Curitiba 09 de dezembro de 1994.


Prof. Ph.D. Glaucio Roloff, Presidente.


Engo. Agro. Ph.D. Renato Antonio Dedecek, Iº Examinador.


Prof. Dr. Marcos Luiz de Paula Souza, IIº Examinador.

DEDICO

à Irene,
Adriana,
Mariana

AGRADEÇO

à DEUS

e a meus pais,

Altevir e Egide

Demais agradecimentos:

- ao meu orientador e amigo Gláucio Roloff
- aos demais professores do Departamento de Solos pelos ensinamentos e pela amizade
- aos funcionários do Curso de Pós-Graduação
- às funcionárias da Biblioteca Setorial.
- aos colegas mestrandos, especialmente àqueles que me antecederam no projeto: Cássio, Jucinei e Lutécia
- aos funcionários da Estação Experimental da Cooperativa Batavo, que me auxiliaram na obtenção dos dados de campo
- aos funcionários do Laboratório de Física do Solo, pelo valioso auxílio na obtenção dos dados
- aos colegas do IPARDES pelo apoio e incentivo

RESUMO

Estudou-se as modificações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Escuro, distrófico, textura argilosa, sob plantio direto, devido principalmente à compactação. Comparou-se dois métodos de preparo inicial (diferentes profundidades de mobilização do solo), e dois níveis de calagem, sob tráfego controlado (linhas com e sem tráfego) na cultura do trigo, durante o terceiro ano de implantação do sistema. Os parâmetros avaliados foram: a resistência à penetração (Índice de Cone), a porosidade, o potencial matricial, e o crescimento radicular. Os resultados mostraram que o efeito da compactação devido ao tráfego é mais pronunciado em superfície, levando à eliminação de diferenças entre os preparos iniciais. Não foi observado impedimento ao crescimento das raízes devido ao tráfego. A avaliação da porosidade na camada entre 15 e 25 cm, comparativamente à observações anteriores, mostrou que ocorreu uma estabilização temporária na estrutura do solo.

ABSTRACT

The present work studied the modifications on soil physical properties of a Dusky Red Latosol under no tillage, especially in relation to compaction. Two tillage methods (different tillage depths), previous to no tillage, and two liming levels were compared, under controlled traffic conditions (rows with and without traffic). The comparisons were made on the third year after the introduction of no tillage, on the wheat crop. Parameters evaluated were: cone index, soil porosity, matric potential and root growth. The results indicated that effects of compaction caused by traffic is more pronounced at the surface, and resulted in the disappearance of the effects of the initial tillage treatments. It was also observed that there was no restriction to root growth under traffic conditions. Comparison of soil porosity, in the 15-25 cm layer, with previous observations, indicates that the soil structure has become temporarily stable.

SUMÁRIO

Resumo	vi
1.Introdução.....	01
2.Objetivos.....	03
3.Revisão Bibliográfica	
3.1 A Compactação e a Estrutura do Solo.....	04
3.2 A Compactação e o Sistema Radicular.....	09
3.3.Características Químicas.....	19
3.4 Caracterização do Latossolo Vermelho Escuro	21
4.Materiais e Métodos	
4.1 Histórico do Projeto	23
4.2 Localização do experimento e caracterização da área.....	23
4.3 Tratamentos	25
4.4 Procedimento para a coleta e processamento dos dados.....	27
4.5 Delineamento experimental e análise estatística.....	32
5. Resultados e Discussões	
5.1 Resistência à penetração (IC).....	33
5.2 Características físicas (porosidade e curvas características de água no solo).....	40
5.3 Parâmetros Radiculares.....	44
5.4 Potenciais Matriciais.....	47
6.Conclusões.....	52
7.Anexos.....	54
8.Referências Bibliográficas.....	60

1.INTRODUÇÃO

Os métodos de preparo do solo introduzidos por colonizadores europeus no Brasil, enterrando os resíduos vegetais e deixando a superfície do solo desnuda por vários meses, podem ser vantajosas para um plantio sem obstáculos, porém são inadequados ao se considerar o relevo e as condições pluviométricas existentes no Paraná (Derpsch et al., 1991). Em oposição, o sistema de plantio direto é muito conhecido e difundido, principalmente como método altamente eficaz no controle de erosão, além de melhorador dos aspectos biológicos dos solos. A médio e longo prazos também diminui custos e estabiliza a produção em níveis mais elevados.

Apesar de o plantio direto (PD) estar consagrado como sistema de manejo conservacionista, é fato constatado que há uma resistência por parte de produtores e de técnicos em adotá-lo, devido a um processo de compactação do solo, crescente com o tempo, quando ocorrem teores mais elevados da fração argila em sua composição. Derpsch et al. (1991) dizem que no plantio direto corre-se o risco de uma compactação superficial progressiva com o tráfego de máquinas pesadas (caminhão, colheitadeiras) sobre a área o que, a longo prazo, dificulta o desenvolvimento do sistema radicular. Voorhes e Lindstron (1983) especularam que o sistema de PD, contínuo e sem controle de tráfego, não é possível em solos de textura argilosa. A ausência de revolvimento é tida como o maior problema, uma vez que para corrigir os efeitos limitantes têm-se que voltar ao sistema de preparo convencional, ou seja, voltar a revolver o solo. Os diferentes preparos convencionais corrigem diferentemente os efeitos da compactação, além de proporcionar diferentes capacidades de suporte de cargas durante os primeiros tráfegos sobre o solo, visto a ação diferenciada de cada equipamento (arado de discos e de aivecas, em diferentes profundidades).

A condição química do solo, principalmente a acidez, associada às boas condições físicas, é de fundamental importância para um bom desenvolvimento radicular das culturas. Como no PD não há revolvimento do solo, a incorporação de corretivos em profundidade fica limitada à implantação do sistema. Assim sendo, é de se esperar que as condições vão se alterando com o

tempo, e o solo torne-se ácido. Esta é outra causa de resistência à adoção do PD, e precisa ser melhor estudada.

Em estudo comparativo de diferentes métodos de preparo do solo Derpsch et al. (1991) relataram que todos os métodos levaram a uma compactação do Latossolo Roxo. Verificaram que sob plantio direto as maiores densidades situavam-se em profundidades entre 0 e 20 cm, ao passo que sob preparo convencional chegava-se à formação de um "pé-de-arado" em profundidades entre 20 e 30 cm. Os valores máximos encontrados, após sete anos de preparos diferenciados, foram de $1,16 \text{ g/cm}^3$ para o PD, e de $1,11 \text{ g/cm}^3$ para o preparo convencional. Com densidades inferiores a $1,20 \text{ g/cm}^3$ problemas de enraizamento ou aeração não são prováveis. Somente com densidades superiores a $1,25 \text{ g/cm}^3$ é possível haver dificuldades no crescimento das raízes. A maior densidade da camada superficial obtida no PD é responsável por uma maior retenção de água devido ao aumento na proporção de poros menores, sendo por isso até favorável este aumento da densidade. Neste sentido, Sidiras e Vieira (1984) demonstraram que tanto o trigo como a soja e o nabo forrageiro se desenvolveram melhor e com maior rendimento nos sulcos compactados pela passagem das rodas do trator durante o plantio. Supoem que este fato é devido à melhor condução da água em solo mais compactado.

A evolução do sistema de plantio direto no estado do Paraná possibilitou que novas áreas pudessem contar com esta técnica no controle da erosão hídrica. Entretanto, persistem dúvidas a respeito de como se comporta o sistema quando utilizado por longo tempo.

2.OBJETIVOS

Este trabalho é parte de um estudo mais abrangente, onde está sendo avaliada a fertilidade, as produtividades, e as transformações físicas por que passa um Latossolo Vermelho Escuro, distrófico, textura argilosa, ao longo de uma série de anos sob plantio direto.

Objetivo Geral: Avaliar como o sistema de plantio direto em um Latossolo Vermelho Escuro, distrófico, textura argilosa, afeta o ambiente radicular devido aos impedimentos relacionados ao processo de compactação.

Objetivos Específicos:

Determinar a influência do preparo e correção do solo, quando da implantação do sistema de plantio direto, para o desenvolvimento da cultura do trigo.

Avaliar parâmetros do sistema radicular do trigo que possam estar sendo afetados pelo preparo anterior e pelo tráfego.

Verificar a ocorrência de reversão/estabilização das características físicas tidas como detrimenais.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 A COMPACTAÇÃO E A ESTRUTURA DO SOLO

Dentro do sistema de produção agrícola, a estrutura está relacionada diretamente ao ambiente radicular e às condições para o tráfego do maquinário na superfície (Roloff, 1986). A importância da estrutura torna-se evidente ao se considerar que, das propriedades intrínsecas do solo, a estrutura é aquela que é mais fácil, freqüente, e profundamente alterada pelo uso agrícola do solo (Shafer e Johnson, 1982). O preparo do solo é a atividade agrícola que mais influi nas propriedades físicas do mesmo. As alterações que o preparo causa às suas propriedades físicas dependem basicamente da intensidade do revolvimento, do trânsito de máquinas e implementos, do manejo dos restos culturais, e da umidade do solo no momento do preparo. Dentre os efeitos do preparo do solo, os mais importantes são as alterações na estrutura e na estabilidade dos agregados (Fernandes et al, 1991).

A estrutura do solo pode ser descrita a nível macroscópico ou microscópico. A descrição macroscópica abrange a relação entre sólidos e poros do solo, muitas vezes caracterizada como densidade do solo, taxa de vazios ou porosidade total. A descrição microscópica envolve interações entre a matriz do solo e a geometria dos poros. Estas interações são interpretadas como propriedades que caracterizam o solo segundo sua resistência ao fluxo do ar e da água.

A compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado, durante a qual ocorre um aumento no adensamento do corpo do solo, e simultânea redução no volume de ar (Gupta et al, 1989). Em outras palavras, o efeito da compactação no solo é uma mudança na sua estrutura. É por isso que compactação do solo é muitas vezes descrita como densidade global, proporção de vazios, ou porosidade total, parâmetros que quantificam a estrutura do solo. A compactação do solo é definida como sendo o processo que causa uma alteração do volume do

solo, resultante da aplicação momentânea de uma carga (Bradford e Gupta, 1986). A compressão do solo, que é a redução no seu volume causada por uma carga externa, ocorre primariamente devido à exclusão de ar ou água dos espaços porosos e ao rearranjo das partículas do solo, e secundariamente devido à compressão e deformação das partículas do solo e compressão do ar e da água nos poros. Isto reflete em uma redução no volume de poros e alteração na distribuição de tamanho dos poros, afetando os fluxos de ar e água.

Efeitos da compactação no rendimento das culturas são devidos às mudanças nos processos físicos, químicos e biológicos do solo, que por sua vez são dependentes da estrutura do solo. Para separar benefícios dos efeitos prejudiciais da compactação, e para se ter noção do alcance da pressão aplicada, e do conteúdo de água não conduzida devido à excessiva compactação, é necessário entender e quantificar mudanças na estrutura do solo sob compactação (Gupta e Allmaras, 1987, citados por Gupta et al., 1989).

A ocorrência das camadas adensadas no perfil depende de quatro fatores : (1) Tipo de preparo do solo - relacionado à presença ou não de revolvimento, e se houver , ao tipo de implemento e número de passes; e.g., o plantio direto resulta em adensamento na superfície do solo em razão do tráfego e da ausência de revolvimento. (2) Área da superfície de contato do material rodante - para uma mesma carga, quanto maior a área menor a pressão, mas maior é a profundidade afetada (Gupta e Larson, 1982; Taylor, 1983; Taylor e Gill, 1984). (3) Tipo de solo - as características dos vários horizontes e sub- horizontes no perfil podem resultar em diferentes compressibilidades e compactibilidades, especialmente devido a variações na distribuição do tamanho das partículas (Akram e Kemper, 1979; Larson et al, 1980). (4) Pêso por eixo do maquinário (Gameda et al., 1984; Schuler e Loweri, 1984) - a literatura recente demonstra consenso de que esta é a causa básica da compactação profunda (Voorhees, 1983; Taylor e Gill, 1984; Soane, 1985; Gameda et al., 1985), posto que eventuais aumentos na área de contato não são suficientes para compensar a grande carga, e ainda fazem com que parte desta carga seja transmitida profundamente no solo.

Resultados de experimentos indicam que, por ocasião das primeiras passadas de maquinário após o preparo, ocorrem as maiores alterações nas propriedades físicas dos solos (Voorhes, 1978; Blackwell et al, 1989). O valor final da densidade do solo depende da magnitude da carga aplicada, e da umidade do solo quando desta aplicação (Gupta e Larson, 1982). A compressão do solo inicia-se em seguida ao preparo, na porção correspondente à curva de compressão do solo virgem, como se o solo não tivesse sido submetido a carga alguma, o que indica susceptibilidade à compactação após o preparo (Culley e Larson, 1987). No sistema de plantio direto, o solo torna-se pré-compactado e resistente o suficiente para suportar os efeitos de tráfegos aplicados posteriormente (Soane e Pidgeon, 1975; citados por Tormena, 1991).

Dependendo dos objetivos, estudos em estrutura do solo podem ser agrupados em duas categorias : (1) geometria dos poros, ou (2) matriz do solo. Cientistas preocupados com água, soluto e gás (movimento) têm caracterizado a estrutura em termos de geometria dos poros, i.e., distribuição do tamanho dos poros e continuidade dos poros. Morfologistas e cientistas trabalhando com erosão do solo têm concentrado seus estudos na matriz do solo, i.e., distribuição do tamanho de agregados e resistência dos agregados (Gupta et al., 1989). Uma medida que descreve a geometria dos poros é a curva característica de retenção de água, que é a relação entre a quantidade de água nos poros do solo, e a energia com que esta água é retida nestes poros. A estrutura do solo a afeta grandemente. Solos argilosos, que formam agregados, retém um maior volume de água do que solos arenosos, a um igual valor de potencial matricial. Em solos agregados, a água do solo a baixos potenciais matriciais está nos vazios formados pelos agregados, enquanto que em altos potenciais está nos vazios formados pelas partículas do solo. Uma vez que a compactação altera a distribuição do tamanho dos agregados, espera-se uma mudança na proporção de espaços inter e intra-agregados. Assim, a forma da curva é um bom indicador de alterações na estrutura do solo ou na geometria do espaço poroso devido à compactação.

Trabalhando em um solo franco argiloso, sob quatro níveis de compactação (1.09; 1.28; 1.48 e 1.66 Mg/m³), Gupta e Larson (1982) observaram que, com um aumento no nível de compactação, a quantidade de água retida em alto potencial matricial diminuiu, enquanto que a quantidade de água retida em baixos potenciais aumentou. Esta mudança na curva reflete uma troca na proporção dos poros do solo, devido à compactação. Ocorrem as seguintes alterações: (a) uma redução no volume total do solo, indicada pela retenção de água em maiores potenciais (-0.1 kPa), (b) uma redução na proporção de poros maiores, com retenção de água entre potenciais de -0.1 e -1.0 kPa, e (c) um aumento na proporção de poros menores, com retenção de água em potenciais a -1.0 kPa e menores. A compactação do solo provoca um aumento na densidade do solo, uma redução na porosidade total, e também, um aumento na proporção de poros menores em detrimento dos poros maiores (Klute, 1982). O tamanho dos poros determina o potencial de água neles retida, e conseqüentemente a sucção necessária para esvaziá-los (Camargo, 1983). Quanto maior o tamanho do poro, menor será a sucção a ser aplicada à água necessária para retirá-la, e vice-versa. Em condições de saturação, a quantidade de água retida pelo solo diminui com a compactação, seguindo a diminuição da porosidade total. Portanto, uma amostra compactada, a altos potenciais, retém menos água que uma não compactada. Entretanto, essa relação se modifica a baixos potenciais, onde a compactada retém mais água. A água retida a potenciais abaixo de -1,0 kPa é de grande interesse para o estudo da disponibilidade de água. A compactação, de maneira geral, aumenta a quantidade de água retida na faixa de disponibilidade (aproximadamente entre -10 e -1500 kPa) para as plantas. Entretanto, é importante que se tenha em mente que esta disponibilidade não é simples de ser interpretada, uma vez que a deficiência de aeração e a resistência mecânica do solo podem dificultar a interpretação da situação. A condutividade hidráulica não saturada de um solo com umidade mais baixa do que a capacidade de campo, é maior para um solo compactado, ao contrário do que acontece para a condutividade hidráulica saturada. Este fato acontece porque a compactação aumenta o número de poros pequenos que permanecem cheios com água quando o solo está com teor de água médio (Kemper

et al., 1971). Sidiras e Vieira (1984), estudando os efeitos da compactação em Latossolo Roxo, com tráfego controlado, observaram que nas faixas compactadas ocorreu uma grande redução no volume de poros $> 10 \mu\text{m}$ com conseqüente aumento da retenção de água pelo solo.

Hill e Summer (1967) estudaram o efeito da compactação na curva característica de nove diferentes texturas de solo e os agruparam em três categorias : (1) Solos arenosos onde o aumento na densidade do solo resultou em um aumento na capacidade de reter água a baixos potenciais matriciais; a magnitude deste efeito diminuiu com a diminuição em potencial de água no solo. (2) Solos francos onde o aumento na densidade resultou em um decréscimo na capacidade de reter água a altos potenciais, e o contrário em baixos potenciais. (3) Solos argilosos onde um aumento na densidade resultou em aumento na retenção de água, e a magnitude deste efeito aumentou com a diminuição dos valores de potencial matricial. Explicam que em solos arenosos, poros maiores predominam, e a compactação tem maior efeito em altos valores de potencial. Em argilas há muito mais poros pequenos e a compactação, por essa razão, tem efeito sobre uma vasta extensão de valores de potencial matricial, particularmente em baixos valores. No caso de solos francos, há uma mesma distribuição dos vários tamanhos de partículas. Em tais solos a compactação resulta mais em redução da porosidade total do que em diminuição no número e volume dos poros maiores, ou do que em aumento do número de poros menores. Deste modo, a curva característica de um solo franco apresenta um intervalo menor de mudança no conteúdo de água retida, em função da compactação, quando comparada às curvas de solos arenosos e argilosos.

3.2 A COMPACTAÇÃO E O SISTEMA RADICULAR

3.2.1 POROSIDADE

Do ponto de vista funcional da estrutura, o componente importante, em relação aos fluxos de ar e água, e penetração das raízes, é o espaço poroso entre os agregados do solo. A disposição tri-dimensional deste espaço poroso no solo constitui o sistema poroso. A estabilidade da estrutura do solo é essencial para a manutenção e, conseqüentemente, funcionamento do sistema.

A gama de tamanhos e formas de poros é imensa, variando desde alguns microns de separação entre as partículas de argila que formam um quasi-cristal, até vários centímetros das rachaduras formadas por dessecação ou túneis formados pela mesofauna do solo (Roloff, 1986). A distribuição dos tamanhos dos poros (DTP) é geralmente calculada através da relação entre umidade volumétrica e potencial matricial (curva de retenção de água) em conjunção com a equação da capilaridade (e.g. , Hillel 1980a)

A representatividade das amostras obtidas a campo com relação aos poros amostrados é discutível. Normalmente as amostras utilizadas em laboratório causam uma subestimação dos macroporos, devido à menor probabilidade destes ocorrerem em amostras de pequenas dimensões. Os poros maiores que 0.005mm são muito sensíveis à manipulação do solo (Lal, 1979). Em função destas limitações o ideal seria determinar a curva de retenção "in situ" . O uso de grandes amostras indeformadas em laboratório poderia ser uma alternativa para melhorar a precisão das estimativas. No entanto, pode ocorrer uma baixa reprodutibilidade deste método em potenciais maiores que menos 6,0 KPa, em solos com grande volume de macroporos (Kneale, 1985).

Existem várias classificações de poros segundo seus tamanhos. Uma classificação com objetivos práticos dividiu-os em macro, micro e mesoporos (Dexter, 1988). Macroporos são

considerados os poros com diâmetro superior a 0,05mm ou o volume de poros drenados no potencial de -6,0 kPa (Carter, 1988), apesar que Beven e German (1981) sugerem um diâmetro mínimo de 3,0 mm para configurar um macroporo. Beven e German (1982), mais tarde, definem macroporos como sendo aqueles com diâmetro suficiente para a ocorrência de fluxo canalizado em condições de não equilíbrio. A diferença entre o volume total de poros, estimados a partir da relação entre a densidade do solo e densidade das partículas, e o volume de macroporos, é definido como volume de microporos. Os macroporos são funcionalmente classificados como poros de transmissão, importantes para o fluxo de água e ar no solo. Já os microporos têm como função principal a retenção de água, difusão de ar e nutrientes no solo. Nesta classificação os microporos também englobam os mesoporos de Dexter (1988).

A continuidade dos poros é particularmente importante em solos agrícolas nos quais a maioria das operações de preparo tendem a perturbar os poros, que são naturalmente contínuos, e promover o surgimento de uma ou mais camadas estruturalmente descontínuas. Como exemplo, Allmaras et al., (1982) demonstraram que o longo tempo de cultivo (50 anos) causou uma redução nos poros maiores da camada superficial de um solo (0 a 35cm), ocasionando uma redução de 10 vezes na condutividade (em função da umidade) em potenciais maiores que -10 kPa em comparação a um campo nativo. A continuidade e a ocorrência de poros de transmissão estão estreitamente ligados à presença e atividade de raízes e minhocas, notadamente em solos que não apresentam em grau significativo a formação de fissuras pelo processo de expansão-contracção associado aos ciclos de secagem-molhamento (e.g. solos com argilas 1:1 e óxidos, predominantemente).

Poros formados por minhocas, em solos onde elas ocorrem, compõem uma fração importante da macroporosidade. Eles são distribuídos aleatoriamente na superfície do solo, com densidade (número/unidade de área) variável, e.g., 50/m² (Bouma et al., 1982) ou 100/m² (Omoti e Wild, 1979). Poros contínuos verticalmente, com comprimentos entre 0,7m (Ehlers, 1975) até 1,6m (Bouma et al., 1982) são citados na literatura. Estes valores variam com a profundidade e

duração do lençol freático no perfil. Outras condições do perfil são também determinantes da ocorrência e importância destes macroporos. Ehlers (1975) determinou que poros de minhocas (entre 2 e 11mm) tiveram sua densidade e volume relativo dobrados no horizonte Ap de um solo após quatro anos de plantio direto, em comparação ao plantio convencional. No plantio direto a maioria destes poros iniciavam na superfície e contribuíam para a transmissão da água até 1,8m de profundidade.

3.2.2 DENSIDADE DO SOLO E IMPEDÂNCIA MECÂNICA

A compactação excessiva reduz a proliferação das raízes no solo e reduz a velocidade dos fluxos de ar e água no solo (Bowen, 1981 ; Unger et al. ,1981 ; Wolf e Hadas, 1984). A caracterização do grau de compactação pode, então, ser feita através da quantificação de uma ou mais das características ou propriedades do sistema poroso afetadas. Comumente, dois parâmetros apenas indiretamente relacionados à estas são comumente utilizados : a densidade do solo e a impedância mecânica determinada por penetrômetro. A determinação da densidade do solo, apesar de ser relativamente simples, depende de cuidados importantes para que seja válida (Cassel, 1982) : (1) o tamanho da amostra deve ser tal que abranja a maioria dos tamanhos de poros existentes, e forneça a precisão requerida em face da variabilidade local desta característica; (2) da mesma forma, o número de amostras retiradas deve ser o suficiente para a precisão desejada; (3) em um solo sob cultivo, a densidade do solo "média" é irrelevante na maioria dos casos, e o importante é a densidade em locais específicos onde o desenvolvimento das raízes possa ser comprometido, e.g., na entre linha com tráfego; e (4) a densidade do solo também varia com o tempo.

Os valores de densidade do solo que limitam o desenvolvimento normal das raízes dependem de vários fatores, incluindo o tipo do solo, o tipo de raiz e a umidade do solo. Bowen (1981) sugere valores generalizados para solos na sua capacidade de campo e de acordo com a classe textural, variando de 1,55 g/cm³ para solo franco-argiloso até 1,85 g/cm³ para os franco-arenosos. Através do exame de dez estudos americanos sob condições diversas, Jones (1983)

determinou que a densidade do solo para condições ótimas às raízes pode ser expressa pela seguinte relação :

$$\text{densidade do solo}(\text{g. cm}^3) = 1,52 - 0,00646 \% \text{ de argila}$$

Assim, para 25% e 50% de argila a densidade ideal seria de 1,35 e 1,20 g/cm³ respectivamente. Tais valores devem ser considerados apenas como indicadores gerais, posto que o processo de desenvolvimento radicular é complexo.

A impedância mecânica é um fator importante para o crescimento radicular, estando relacionada com a elongação e proliferação de raízes no solo. A utilização de penetrômetros para avaliar a impedância mecânica é controvertida (Cassel, 1982). Alguns pesquisadores argumentam que os penetrômetros são inadequados por terem diâmetros maiores que as raízes, penetrarem no solo mais rapidamente que as raízes, e serem incapazes de desviarem partículas e agregados do solo. A resistência à penetração é expressa através da relação entre a força exercida para fazer penetrar um cone metálico no solo e sua área basal, comumente expressa como índice de cone (IC) .

É essencial para a interpretação dos resultados que estes sejam acompanhados pela caracterização física do solo no momento da amostragem, especialmente da densidade do solo e da umidade. Além disso, Vepraskas (1984) demonstrou que os resultados são também controlados pela distribuição do tamanho dos poros. A posição linha e entre-linha das culturas, quando da amostragem, é uma fonte altamente significativa na variação do índice de cone (Cassel et al., 1978), provavelmente devido à ação das raízes no processo de agregação e dessecação do solo. A dependência do índice de cone em relação à umidade dificulta a operacionalização das amostragens e, idealmente as determinações devem ser feitas com a umidade próxima à capacidade de campo (Cassel, 1982).

O cone, ao penetrar o solo, encontra uma resistência que pode ser atribuída a dois fatores : a resistência à compressão, e a resistência friccional ao longo das paredes do cone (Tollner e Verna, 1984), sendo que esta última pode ser responsável pela maior parte da resistência total (Groenevelt et al., 1984). A resistência friccional deveria ser subtraída da resistência total para melhorar as estimativas, pois as raízes não a encontram devido à ação lubrificante da excreção de mucilagens das células da coifa (Barley, 1976).

A sensibilidade dos penetrômetros possibilita uma avaliação mais precisa dos tratamentos quando comparados à densidade dos solos (Cassel et al., 1978). Enquanto a densidade dos solos em estudos sobre preparos varia entre $<1,0$ e $>1,7$ g/cm³, valores de IC variam entre zero e $>8,83$ MPa (Cassel, 1982). A variabilidade dos resultados do penetrômetro, porém, é grande e exige esquemas de amostragem intensivos que levem em conta a variabilidade no espaço e no tempo.

Vários autores têm avaliado a impedância mecânica associada a diferentes sistemas de preparo do solo. O preparo do solo determinará a magnitude da impedância mecânica, conforme a intensidade e profundidade de mobilização (Cassel, 1982). Trabalho de Gooderham, (1976; citado por Cassel, 1983), indica que o preparo profundo do solo alterou sua densidade em todo o perfil mobilizado, com consequente redução no IC em todo o perfil, enquanto que preparos que mobilizaram o solo até 20-25 cm não foram capazes de evitar elevados valores de densidade e de índices de cone.

A identificação de valores de IC à campo restritivos ao crescimento radicular é difícil, para a maioria dos solos, porque grande parte dos dados disponíveis provêm de experimentos que identificaram os valores de IC no qual o crescimento raiz praticamente cessou, ou teve sua taxa de alongação seriamente reduzida (Gerard, 1982). Os valores obtidos por penetrômetros, limitantes ao desenvolvimento de raízes, variam com o tipo de penetrômetro, com o grau de desenvolvimento da hierarquia da estrutura do solo, tipo de raiz, e com a umidade do solo no momento das determinações. Taylor e Ratliff (1969) demonstraram que a velocidade de alongação

de raízes de algodão e amendoim foi reduzida em 50% por valores de IC acima de 0,7 e 2,0 MPa, respectivamente. A produtividade do algodão em um experimento no Alabama foi reduzido substancialmente pela presença de uma camada artificialmente produzida com IC de 0,8 MPa, em diversas profundidades (Lowry et al., 1970). A soja também demonstrou comportamento similar (Rogers e Turlow, 1973; citados por Bowen, 1981). Henderson (1989) adotou como crítico um IC de 1,0 MPa em modelos para prever os efeitos da compactação sobre o crescimento e produção de trigo, na Austrália.

A produtividade das culturas é altamente dependente da distribuição da precipitação, em situações onde a proliferação das raízes é limitada devido à compactação. Se as chuvas forem bem distribuídas, ou suplementadas, durante o crescimento da cultura, condições moderadas de compactação não afetarão a produtividade (Voorhes et al., 1985). Em casos de precipitação deficiente ou de densidades do solo excessivamente baixas ($< 1,0 \text{ g/cm}^3$), certo grau de compactação pode ser benéfico por incrementar o volume de água retido (Sidiras e Vieira, 1984). Além disso, as raízes das plantas podem penetrar camadas aparentemente restritivas através de macroporos (Nasch e Baligar, 1974). Tais vias de penetração não são detectadas por penetrômetros ou pela determinação da densidade do solo. A avaliação periódica da resistência à penetração pode ser um método apropriado e prático para se determinar a necessidade de revolvimento profundo do solo, e avaliar os efeitos do manejo e seqüência de culturas sobre as propriedades físicas dos solos (Gerard et al., 1982).

3.2.3 RAÍZES E ESTRUTURA

As raízes e hifas agem no processo de formação e estabilização dos agregados do solo e, conseqüentemente, na formação e estabilização da estrutura. Agindo como agentes cimentantes temporários são, conforme modelo de Tisdall e Oades (1982), as responsáveis pela formação e estabilidade dos agregados maiores que aproximadamente $250 \mu\text{m}$ (macroagregados). Têm

persistência no solo variando de meses até uns poucos anos, e são sensíveis às modificações do ambiente edafológico induzidas pelo preparo do solo.

As raízes produzem agregação estável através de vários fatores. Ao produzirem resíduos orgânicos para a decomposição as raízes promovem uma alta população microbiana na rizosfera (Campbell e Porter, 1982). Este efeito está diretamente relacionado às diversas fontes de produção de polissacarídeos e à importância destes na formação e estabilização dos agregados (Lynch e Bragg, 1984). As raízes, especialmente de gramíneas, também agem envolvendo fisicamente os microagregados do solo como uma malha, formando e estabilizando macroagregados mesmo após sua morte (Tisdall e Oades, 1979). As raízes fornecem ainda o substrato para o desenvolvimento da fauna do solo, possibilitando o surgimento de grandes populações (Tisdall e Oades, 1982).

A importância das raízes para a estrutura está também relacionada às hifas dos fungos associadas a elas. As hifas agem de maneira similar às raízes finas: elas promovem resistência mecânica adicional, exudam mucilagens e acabam como substrato de outros micro-organismos (Lynch e Bragg, 1985). As hifas, assim como as raízes e bactérias, ao se decomporem formam o centro de um agregado estável em água (Oades, 1984).

Raízes e hifas se complementam quanto aos poros explorados e posteriormente estabilizados. Os menores poros ocupados por pêlos radiculares de gramíneas têm diâmetros em torno de 5 a 10 μm (Nye e Tinker, 1977). As hifas, principalmente as de micorrizas vesículo-arbusculares, podem ser consideradas como extensão do sistema radicular e ocupam os poros de até 10 μm (Oades, 1984). Em um solo com alta densidade radicular, vegetado com azevém por exemplo, praticamente toda a camada superficial pode ser considerada com rizosfera dada a proximidade das raízes. Isso explica o alto grau de agregação e estabilidade nestas circunstâncias (Tisdall e Oades, 1979).

Grande parte da ação agregante e estabilizante das raízes está associada a seus produtos de exudação e decomposição, que resultam em polissacarídeos através da ação conjunta dos

micro-organismos. Os polissacarídeos são considerados agentes cimentantes apenas transitórios. Mesmo assim, a distinção de raízes e hifas como agentes temporários é justificável devido ao maior tempo que estas atuam fisicamente no solo, e por distribuírem a ação dos polissacarídeos no espaço tri-dimensional (Roloff, 1986).

3.2.4 CRESCIMENTO RADICULAR

O sistema radicular deve suprir as plantas com água e nutrientes necessários ao seu desenvolvimento, e isto requer, geralmente, uma alta densidade de raízes próximas à superfície, onde as concentrações da maioria dos nutrientes são maiores, e exige-se pelo menos uma raiz por planta penetrando em profundidade, para extrair água armazenada (Dexter, 1988).

Os valores de densidade radicular são aproximadamente exponenciais para muitas culturas, com valores máximos na superfície em torno de 10 cm de raiz/cm³ de solo no caso de cereais. Em torno de 1,0 m de profundidade tais valores podem ser somente de 1 cm/cm³ ou menos (Dexter, 1988). A compactação do solo tende a aumentar a densidade radicular na superfície do solo, até pelo aumento da emissão de raízes laterais, e a diminuir a profundidade de enraizamento no perfil do solo (Cintra e Mielniczuk, 1983).

Em solo Vertic Ustorthens (34,4% de argila e 44,9% de areia), um estudo de Ruggiero et alli (1988) demonstrou que os métodos de preparo (plantio direto, rotovator, aração a 20 cm, e aração a 40 cm) não influenciaram a taxa de densidade de raízes, mas a distribuição junto ao perfil foi afetada. A densidade de raízes foi maior e mais uniforme nas áreas aradas, enquanto que áreas não preparadas mostraram concentração em profundidades abaixo de 40 cm. O plantio direto mostrou mais raízes em profundidade. Observações diversas foram obtidas por Graham et al.(1986) ao estudar o efeito da compactação causada por tráfegos de veículos agrícolas no crescimento e rendimento de trigo de inverno sob plantio direto. O experimento, em solo franco-siltoso, submeteu a cultura a condições de nenhum tráfego, tráfegos de baixa (uma passagem de trator e colhedeira, com peso máximo por eixo de 4,0 t, equivalendo a 74 kPa),

média (93 kPa) e alta pressão (118 kPa), com a umidade do solo variando entre o limite de plasticidade inferior e a capacidade de campo. Medidas feitas seis meses após mostraram que entre 10 e 40 cm de profundidade, o tratamento de média pressão apresentou a maior densidade radicular, aproximadamente 2,0 cm/cm³, enquanto que sob as condições de nenhuma e alta pressão os valores ficaram próximos a 1,0 cm/cm³. Já, entre 40 e 70 cm de profundidade a densidade foi maior em condição de nenhuma pressão. Observou-se muito pouca coesão entre raízes e solo no tratamento sem tráfego, e que o crescimento em profundidade foi menor na condição de maior pressão. Este trabalho revelou que o solo trafegado com um máximo de 4,0 t por eixo (pressão < 100 kPa) teve uma macroporosidade de 14% , e o rendimento em grãos foi de 10 t/ha, 6,0 a 7,0% maior que os demais. Tais resultados mostram que em condições de seca, os riscos de perdas são menores em plantio direto com tráfego a baixas pressões.

O desenvolvimento do sistema radicular é dependente do sistema poroso do solo. A planta desenvolve seu sistema radicular explorando poros de tamanho adequado, ou deve fazer novos poros vencendo a resistência do solo e deslocando a ponta da raiz para frente, via aumento da pressão de crescimento. As pontas das raízes geralmente são incapazes de entrarem em poros rígidos, menores do que o seu diâmetro (Wiersum, 1957). Entretanto, se o solo for deformável, as raízes devem ser capazes de alargar os poros existentes, ao mesmo tempo que absorvem água e nutrientes. As raízes capilares (normalmente com diâmetro de 10 µm) importantes na absorção de nutrientes, são consideradas incapazes de formarem seus próprios poros, requerendo assim poros pré-existent, iguais ou maiores do que elas próprias (Dexter, 1988). Quando uma raiz encontra um poro cujo diâmetro seja menor que o seu, só prosseguirá expandindo se for capaz de exercer uma pressão suficiente para dilatar o poro, ou tem que diminuir seu diâmetro o suficiente para passar através dele. Parece que, na realidade, o diâmetro da raiz aumenta quando encontra tais obstáculos (Russel, 1977).

As plantas necessitam de oxigênio para completar sua atividade metabólica. A necessidade mínima para o desenvolvimento de plantas é de pelo menos 10% do volume do solo

com poros cheios de ar na capacidade de campo, e de que haja no mínimo 10% de oxigênio nestes poros(Dexter,1988). O suprimento de oxigênio para as raízes depende de fatores complexos, como continuidade, tortuosidade, tamanho dos poros e espaçamento dos poros cheios de ar. Cannel e Jackson (1981), revisando vários autores, agrupam os poros do solo em função de seu tamanho, em três categorias : os grandes poros, que estão cheios de ar na capacidade de campo, os poros com ar quando em potenciais entre -5 e -10 kPa, e os poros com diâmetros entre 60 e 30 μm . Considerando que em trigo e cevada, o diâmetro dos eixos da raiz principal varia de 300 a 700 μm , e das laterais secundárias varia de 100 a 300 μm e considerando que as raízes normalmente não entram em poros rígidos menores do que seu diâmetro, pode-se dizer que os poros penetrados por estas raízes estão freqüentemente cheios de ar.

Desde que hajam poros suficientemente grandes, raízes podem se desenvolver em solos com alta resistência (Wiersum, 1957; Aubertin e Kardos, 1965). Trowse (1978) alerta que o tamanho e a conectividade do sistema poroso são fatores até mais importantes que a densidade global e a resistência mecânica do solo.

Em um experimento com cevada, onde pressões de 0,02 MPa foram aplicadas, observou-se 40% de redução no crescimento das raízes. Esta redução somente ocorreu quando as raízes não encontraram poros maiores que o seu diâmetro (Lindberg e Petterson, 1985). Ehlers (1983) verificou que índices de cone de 3,6 MPa impediram o crescimento radicular de aveia no horizonte Ap. No entanto, o valor crítico aumentou para 5,0 MPa no sub-solo, sob plantio direto, devido à presença de poros contínuos, formados através de canais oriundos de raízes anteriores e túneis de minhocas, que não foram detectados pelo penetrômetro.

Resultados de experimentos revisados por Comim (1993), envolvendo comparação direta da resistência ao penetrômetro e à raiz, indicam que os primeiros medem uma resistência de duas a oito vezes maior do que as raízes efetivamente encontram no solo . Observações com penetrômetros sugerem que a resistência tem efeito mínimo na elongação de raízes, salvo se a

resistência registrada exceda a 0,4 MPa (Mazurak e Pohlman, 1968; Greacen e Oh, 1972, citados por Hill et al., 1990).

Robertson et al. (1977), citados por Eck e Unger (1985) declararam que a profundidade de cultivo teve pequeno efeito no rendimento das culturas, exceto nos solos que tinham problemas específicos. Cassel (1980) verificou os efeitos da profundidade de aração e da incorporação de calcário e de fósforo sobre as propriedades físicas e químicas de um solo franco-arenoso, e de uma areia franca, após 15 anos. Ele encontrou que a resistência do solo aumentou e a taxa de infiltração diminuiu com o aumento da profundidade de aração, o que criou condições desfavoráveis ao crescimento radicular.

A literatura sobre camadas compactadas provenientes de implementos de cultivo indica que num perfil de solo favorável ao crescimento radicular, a destruição destas camadas permite uma exploração radicular mais completa. Quando ocorrem períodos secos, o aumento do suprimento de água decorrente da maior exploração do solo pelo sistema radicular, pode aumentar os rendimentos das culturas. O preparo profundo destes solos somente aumenta os rendimentos quando problemas específicos são solucionados (Ecker Unger, 1985).

3.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, RAÍZES E ESTRUTURA

3.3.1 CRESCIMENTO RADICULAR

É reconhecido que, na maioria dos solos, não é propriamente o pH, ou seja, a atividade dos íons H^+ na solução do solo, que determina a ação prejudicial que eles venham a manifestar às plantas nele desenvolvidas. Pearson (1975) considera a toxidez do alumínio como a maior causa da baixa fertilidade dos solos ácidos. Na maioria dos solos, devido à relação inversa bem conhecida entre a concentração do alumínio em solução e o pH, pode-se definir a faixa de pH da suspensão solo-água compreendida entre 4,0-5,0 como a mais provável de ocasionar problemas para o crescimento das plantas.

A incorporação de calcário ao solo tem sido bastante estudada em cereais de estação fria, especialmente em trigo e cevada. A adição, especialmente de cálcio e magnésio, em altas doses traz uma série de alterações no solo. A calagem permite a melhor utilização pelas plantas de adubos minerais fosfatados, principalmente pelo aumento do sistema radicular, que explora um volume maior de solo. Há que se considerar no aspecto da utilização do calcário a reação do cereal que vai ser cultivado. Neste caso obtiveram-se respostas extremas. O trigo foi sendo selecionado em solos com pH bastante baixos, tendo as atuais variedades alta tolerância à alumínio e manganês. Quando sensível às condições adversas do solo (toxidez de alumínio e manganês), o trigo tem pequeno desenvolvimento e apresenta-se amarelado, sendo este sintoma chamado de crestamento. Hoje, as variedades brasileiras situam-se entre as de grande tolerância ao crestamento e, em função disto, a resposta do trigo à correção do solo não foi grande e, em alguns casos, nula (Mundstock, 1983).

Nas raízes, o excesso de alumínio interfere na divisão celular causando danos, o que reduz a elongação do eixo principal, tornando-as espessas, de coloração castanha, quebradiças e as vezes com manchas necróticas, além de inibir seu crescimento. Assim, o sistema radicular não apresenta raízes finas, é reduzido em tamanho, e de aparência coralóide (Malavolta et al., 1989).

3.3.2 ESTRUTURA

Materiais húmicos aromáticos degradados, associados a ferro e alumínio amorfos e a alumino-silicatos são considerados, segundo modelo proposto por Tisdall e Oades (1982), agentes cimentantes persistentes, mais estáveis no tempo, menos sensíveis ao manejo do solo (Oades, 1984) e responsáveis pela formação do menor nível de agregação (agregados menores que aproximadamente $2,0 \mu m$). As unidades estruturais básicas (microagregados) são formados por ligações do tipo argila-metal polivalente-complexo de matéria orgânica (Edwards e Bremner, 1967, citados por Roloff, 1986). Os mecanismos de ligação são descritos por vários autores e incluem forças de Van der Waals, eletrostáticas, ligações covalentes e pontes de hidrogênio (Roloff, 1986). A eficácia destes mecanismos, em formar os microagregados estáveis, em solos

onde predominam materiais de caráter anfótero, depende também da magnitude e da natureza das cargas elétricas .

As cargas negativas do solo podem ser permanentes ou dependentes de pH (Raij, 1991). As permanentes existem na estrutura dos minerais, e por essa razão estão sempre operantes. Elas são importantes em minerais de argila do tipo 2:1 e devem-se a substituições isomórficas. Os minerais de argila que têm importante carga permanente são illita, montmorilonita, e vermiculita. Esses três minerais são raros em solos tropicais bem drenados, como é o caso dos nossos Latossolos.

As cargas dependentes de pH são influenciadas pela reação do solo e são mais importantes na matéria orgânica, caulinita, e óxidos de ferro e alumínio, os principais materiais responsáveis pela propriedade de troca de íons em solos de regiões tropicais úmidas, notadamente os Latossolos.

A superfície do óxido hidratado de alumínio pode apresentar-se desprovida de carga e o pH a que isso ocorre é chamado de ponto de carga zero (PCZ). Se o pH se elevar acima do PCZ , ocorre a dissociação de hidroxilas da superfície do mineral, com liberação de cargas negativas e aumento na capacidade de troca de cátions. Essas cargas negativas obrigatoriamente serão contrabalançadas por cátions trocáveis (Raij, 1991).

Em solos onde coexistem materiais anfóteros com diferentes pontos de carga zero, como os Latossolos, ocorrem simultaneamente cargas positivas e negativas nos valores de pH comumente encontrados no campo. Isto dá origem a um grande número de ligações eletrostáticas (El-Swaify, 1976) e pode explicar a grande estabilidade dos microagregados deste solo. Esta estabilidade, porém, pode ser alterada por aumento do pH (Tama e El-Swaify, 1978)

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO LATOSSOLO VERMELHO ESCURO

Sob esta denominação estão compreendidos solos minerais com **B** latossólico, de textura argilosa ou média, ricos em sesquióxidos, porém com teores de óxidos de ferro, titânio e

manganês menores que os do Latossolo Roxo. São muito profundos, de seqüência de horizonte A, B e C, muito porosos e permeáveis, bem acentuadamente drenados quando de textura argilosa e acentuadamente a fortemente drenados quando de textura média.

No horizonte A os de textura argilosa apresentam estrutura granular de fraca a moderadamente desenvolvida e de tamanho pequeno a médio; a consistência varia de ligeiramente duro a duro quando seco e de ligeiramente plástico a plástico e de ligeiramente pegajoso a pegajoso quando molhado.

O horizonte B apresenta espessura superior a 250 cm, com estrutura ultrapequena granular com aspecto de maciça porosa "in situ", sendo que a parte superior deste horizonte pode apresentar estrutura em blocos subangulares, pequenos e fracamente desenvolvidos. A consistência para os de textura argilosa varia de macio a ligeiramente duro quando seco, de friável a muito friável quando úmido e quando molhado de pegajoso a muito pegajoso, sendo normalmente plástico.

O experimento foi instalado em um **Latossolo Vermelho-Escuro Distrófico A** proeminente textura argilosa fase floresta subtropical perenifólia relevo suave ondulado (Embrapa e IAPAR, 1984). O material responsável pela formação destes solos provém principalmente de resíduos intemperizados de rochas sedimentares, de natureza argilosa, do Permiano Inferior, podendo apresentar mistura com material arenoso. Ocorrem em áreas de clima Cfb, da classificação de Koeppen. São solos que além de possuir boas condições físicas e um relevo favorável à mecanização, têm elevada capacidade de retenção de água e boa permeabilidade, apresentando porém baixa fertilidade natural.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 HISTÓRICO DO PROJETO

Este trabalho, que avaliou o ambiente radicular para a cultura do trigo, se insere em um projeto destinado a acompanhar as modificações físicas e químicas por que passa um solo de textura argilosa submetido ao sistema de Plantio Direto, ao longo de anos. Para tanto selecionou-se uma área que estava em pousio de seis meses, e que anteriormente vinha sendo preparada pelo sistema convencional, com eventual uso de grade pesada.

O experimento foi instalado em maio/89, com parcelas preparadas com arado de discos (20 cm de profundidade) e outras com arado de aivéas (35 cm de profundidade). Após a incorporação de calcário, em alguns tratamentos, foi realizada uma gradagem leve em todos os tratamentos e realizado o primeiro plantio, com ervilhaca. Todos os plantios subsequentes foram no sistema de Plantio Direto (QUADRO 1), utilizando-se uma plantadeira SEMEATO PAR-2800 para milho e soja, e semeadeira MENEGAZ para ervilhaca, aveia preta e trigo.

QUADRO 1 ROTAÇÃO EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO		
SAFRAS	CULTURAS	
	Inverno	Verão
89/90	ervilhaca	milho
90/91	aveia preta	soja
91/92	TRIGO	soja

4.2 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Cooperativa Batavo, localizada no Município de Ponta Grossa- PR., a 25° 20' de latitude sul, e a 50° 20' de longitude oeste, em um solo classificado como Latossolo Vermelho-Escuro distrófico, derivado de resíduos imtemperizados de rochas sedimentares de natureza argilosa, situado no terço superior da rampa, com 6% de

declividade. O clima da região é do tipo Cfb, conforme a classificação de Koeppen (Godoy et al., 1976).

As análises granulométricas e de densidade de partículas foram determinadas através da coleta de amostras quando da instalação do experimento. Os resultados estão nas TABELAS 1 e 2, respectivamente. A TABELA 3 mostra as condições químicas do solo a partir de amostras coletadas previamente à instalação do experimento. Tanto as análises físicas como as químicas foram feitas de acordo com a metodologia descrita pela EMBRAPA (1979).

TABELA 1- ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO			
Profundidade (cm)	Areia total %	Silte %	Argila %
0-10 cm	37,93 (0,6) *	16,07 (1,5)	46,0 (2,0)
10-20 cm	36,40 (2,1)	15,15 (2,7)	48,0 (2,6)
20-30 cm	34,67 (1,2)	15,13 (0,8)	50,0 (4,0)
30-40 cm	34,73 (1,1)	13,27 (0,8)	52,0 (0,0)

*Valores entre parenteses são os desvios padrões das médias de 3 repetições

TABELA 2-DENSIDADE DE PARTÍCULAS (g/cm ³) DO LE	
Profundidade (cm)	Preparo a 20 cm
0-10 cm	2,58 (0,07) *
10-20 cm	2,65 (0,07)
20-30 cm	2,64 (0,06)
30-40 cm	2,66 (0,05)

*Valores entre parenteses são os desvios padrões das médias de 3 repetições

TABELA 3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO LE (anterior à instalação do experimento)										
Prof. (cm)	pH CaCl ₂	Acetato meq/100 cm ³ de solo					P ppm	C %	m %	V %
		Al ³⁺	H ⁺ + Al ³⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺				
0-10	5,2 *	0,00	5,5	4,7	3,1	0,40	9,5	2,2		48,0
10-20	4,9	0,10	6,2	2,8	1,7	0,20	3,0	2,2	3,2	32,6
20-30	4,6	0,50	5,6	1,4	0,7	0,08	0,9	2,0	33,7	20,9
30-40	4,6	0,40	5,5	1,3	0,7	0,05	0,5	1,5	29,6	19,7
40-50	4,7	0,20	5,2	1,4	0,8	0,04		1,5	13,8	22,1
50-60	4,8	0,06	4,8	1,5	0,9	0,03		1,3	3,9	24,2

*Médias de 3 repetições

4.3 TRATAMENTOS

Os tratamentos consistiram em dois métodos de preparo inicial (arado de discos e arado de aivecas, à 20 e à 35 cm de profundidade, respectivamente), dois níveis de calcário (com e sem calcário), dois níveis de tráfego (com e sem tráfego), em diferentes profundidades de observações. Em todas as parcelas foi adicionado fosfato yoorin para atingir 15 ppm de fósforo no solo. Os tratamentos foram implantados em maio/89.

TRATAMENTOS:

A sC T: preparo inicial a 20 cm de profundidade, sem calcário e com tráfego;

A cC T: preparo inicial a 20 cm de profundidade, com calcário e com tráfego;

A cC : preparo inicial a 20 cm de profundidade, com calcário e sem tráfego;

B sC T: preparo inicial a 35 cm de profundidade, sem calcário e com tráfego;

B cC T: preparo inicial a 35 cm de profundidade, com calcário e com tráfego;

B cC : preparo inicial a 35 cm de profundidade, com calcário e sem tráfego.

Os métodos de preparo ficaram dispostos em parcelas de 40 x 5 m , e os níveis de calcário e profundidades de observações em sub-parcelas de 20 x 5 m . O tráfego foi controlado em todos os tratamentos a partir da semeadura da primeira cultura, de forma que criaram-se faixas com e sem tráfego. O deslocamento de trator e colhedeira foi orientado através de marcos, que indicavam o centro das parcelas, conforme mostra o croqui da área experimental na FIGURA 1.

Tomou-se o devido cuidado para que os tráfegos não acontecessem quando o solo se apresentasse com teores de umidade elevados (próximo à CC), que pudessem agravar o processo de compactação.

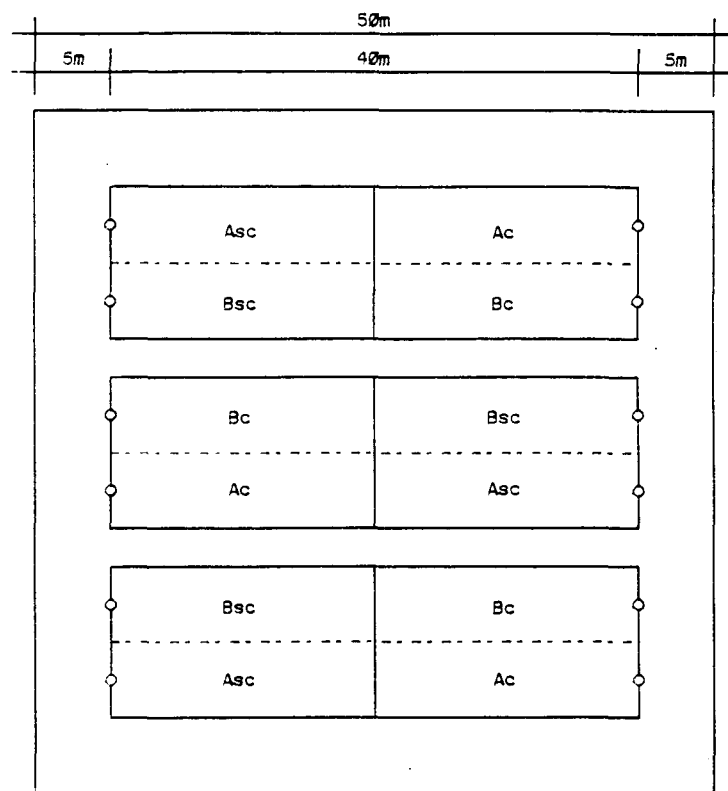


FIGURA 1 - CROQUI DA ÁREA EXPERIMENTAL

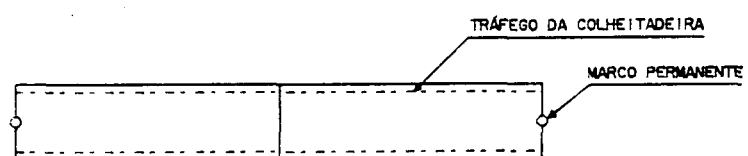


FIGURA 1a - CROQUI DA DISPOSIÇÃO DO TRÁFEGO NAS PARCELAS

4.4 PROCEDIMENTO PARA COLETA DE DADOS

4.4.1 Determinação da Resistência à Penetração:

As determinações de resistência à penetração foram feitas após a colheita do trigo utilizando-se um penetrômetro cônico, modelo SOLOTEST S310, com ângulo de penetração de 30° e área da base do cone de 6,33 cm². Amostras deformadas para a determinação da umidade gravimétrica nas profundidades amostradas foram coletadas, simultaneamente às determinações de resistência, para se proceder à uniformização dos resultados ao longo do perfil.

Utilizou-se um "gabarito" constando de sete pontos (A a G), distanciados entre si de 15 cm. O ponto A foi colocado no centro da entre-linha trafegada, e os demais pontos voltados para o interior da parcela, de modo a determinar a resistência à penetração ao longo de uma secção, haja vista as determinações terem sido feitas, em profundidade, em intervalos de 5 cm, partindo da superfície do solo até atingir 70 cm.

No cálculo da resistência à penetração, os valores brutos obtidos à campo foram transformados em índice de cone através da equação abaixo, obtida da calibração de fábrica do penetrômetro:

$$IC = 0,000855 + 0,559 (LD) \quad [1]$$

onde IC é o índice de cone (Mpa) e LD é a leitura obtida no campo em centésimos de mm.

Em época anterior à instalação do experimento Tormena (1991) procedeu a uma pré-amostragem para avaliar o grau de compactação. Seus resultados revelaram um pico de resistência entre as profundidades de 0-5 e 5-10 cm, com valores de IC de 0,75 e 0,8 Mpa respectivamente, devido aos efeitos do manejo anterior. Considera que os valores não muito elevados de IC,

considerando o uso de grade pesada em preparos anteriores, podem ser devido ao efeito do pousio (aproximadamente seis meses) dado sobre a área antes da instalação do experimento.

Uma vez instalado o experimento, e a área submetida ao sistema de plantio direto, sujeita aos tráfegos cumulativos no tempo, (Tormena, 1991) em sucessivas determinações observou que os valores de IC foram crescentes, atingindo em 05/91 (após a colheita da soja) valores máximos inferiores a 1,5 MPa, a uma umidade de 0,34 g/g, sendo que o preparo com arado de discos a 20 cm foi o mais suscetível à compactação em superfície, mas que na camada entre 10-20 cm foi o preparo com aivéas a 35 cm aquele que mais sentiu os efeitos do tráfego. Nas entre-linhas sem tráfego, constatou que ocorrera uma estabilização da resistência à penetração, com os valores de IC sempre inferiores a 0,6 Mpa. Seus resultados mostraram que os efeitos do tráfego se concentraram nos primeiros 20 cm em profundidade, e a análise estatística não evidenciou diferenças devido ao calcário.

Tormena (1991) desenvolveu um trabalho específico para proceder à calibração dos valores de resistência à penetração em relação com o conteúdo de água no solo. Assim, obteve-se através de equações de regressão uma relação entre a variação de IC e o logaritmo natural do conteúdo de água no solo (U, em g/g) possibilitando a calibração do IC para um valor padrão de umidade:

$$\Delta IC = -4,188 - 4,389 \ln U \quad [2]$$

Em nosso trabalho a correção do IC foi feita considerando-se um valor padrão de umidade de 0,32 g/g (valores por profundidade no anexo), tomada como valor médio obtido durante a sequência de amostragens realizadas à campo, e inferior à umidade na capacidade de campo, considerada aquela obtida à pressão de 60 cm de coluna de água: 0,47 g/g, na média dos tratamentos. Assim, havendo diferenças no conteúdo de água medido por ocasião das amostragens em relação àquela umidade padrão, obteve-se (pela equação 2) um valor a ser adicionado ou subtraído ao IC originalmente obtido (equação 1).

Com os resultados de IC obtidos nas secções amostradas (90 cm x 70 cm), em intervalos de 15 cm na superfície, partindo do centro da linha trafegada em direção ao interior da parcela, e em intervalos de 5 cm em profundidade, elaboraram-se isolinhas de resistência à penetração, para evidenciar e observar a distribuição do efeito do tráfego na compactação do solo.

4.4.2 Determinação Dos Parâmetros Radiculares:

A metodologia seguida para a coleta das amostras, e para determinar-se os parâmetros radiculares é a descrita no trabalho de Comin (1992). Para a coleta de amostras utilizou-se o método do trado, descrito por Bohm (1979). Consiste em um trado com recipiente cilíndrico para a coleta de um volume de solo, medindo 7,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de comprimento, e com a extremidade cortante serrilhada. As amostras foram coletadas nas entre-linhas da cultura do trigo, com e sem tráfego, nas profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm, 30-40 cm, 50-60 cm, e 70-80 cm. O período de coleta foi durante a fase de enchimento de grãos. Durante o transporte do campo ao laboratório, 4 das 18 amostras coletadas entre 0-10 cm foram extraviadas irreversivelmente.

As amostras de solo foram deixadas em uma solução de hidróxido de sódio (25 ml) e água (1 litro) durante 12 horas, para a dispersão das argilas, e em seguida foram lavadas sobre um jogo de peneiras com malhas de 2,0; 1,0; 0,7 e 0,2 mm. A separação das raízes de trigo de outros materiais, como raízes secas de outras plantas e matéria orgânica, foi realizada manualmente com pinças de ponta fina. Em seguida as raízes foram acondicionadas em sacos plásticos contendo solução de etanol a 50%, e armazenadas a 0 °C até serem levadas à determinação dos seguintes parâmetros: densidades de massa fresca e massa seca, densidade de comprimento, e raio médio das raízes.

A densidade de massa fresca foi determinada usando-se balança de precisão com aproximação da segunda casa decimal, e a densidade de massa seca (MS) foi determinada após secagem em estufa a 60°C, durante 48 horas.

A densidade de comprimento (**C**) foi determinada a partir do método de Tennant (1975) e que consiste em contar o número de pontos de contato das raízes quando dispostas sobre uma grade ou malha, e que utiliza a equação

$$C = N \cdot f_c \quad [3]$$

onde **C** é o comprimento radicular (cm/cm³), **N** o número de pontos de contato, e **f_c** é o fator de correção, variável de acordo com o tamanho da grade utilizada, e que no nosso caso foi de 1,0 cm² com o correspondente **f_c** de 0,7857.

O raio médio (**R**) foi determinado segundo Shenk e Barber (1979), pela equação:

$$R = (mf / 3,1416)^{0,5} \quad [4]$$

onde **R** é o raio médio das raízes em mm, e **mf** é a massa fresca em gramas.

4.4.3 Determinação das Características Físicas Solo

A partir dos resultados obtidos por Tormena (1991), que lhe permitiram concluir que até a profundidade de 35 cm não houve estabilização das propriedades físicas do solo nas linhas sob tráfego, e que este tráfego foi o principal fator na alteração da porosidade até os 20 cm, sobrepondo-se aos efeitos do preparo, definimos a camada entre 15-25 cm, nas linhas trafegadas, para avaliarmos o grau de comprometimento da porosidade imposto pela compactação após o terceiro ano de plantio direto.

Foram coletadas após a colheita do trigo, entre 15-25 cm, amostras indeformadas de solo (anéis volumétricos). Com estas amostras foram determinadas em laboratório as curvas características de água no solo, densidade do solo, porosidade total, macro e micro porosidades e capacidade de água prontamente disponível para os diferentes preparos iniciais, com e sem calcário, sob tráfego.

Foram determinadas as curvas características de água no solo, através de mesas de tensão com placas porosas, adaptadas de Kiehl (1979), nos potenciais de -1, -2, -4, e -6 kPa, e em câmara de pressão de Richards (Klute, 1986) nos potenciais de -10, -33, -100 e -300 kPa. A elaboração das curvas foi feita através do programa estatístico SYSTAT, que utilizou as tensões e umidades volumétricas obtidas em laboratório, fazendo os ajustes pela fórmula de Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha \cdot h)^n]^m \quad [5]$$

onde θ_r é umidade volumétrica residual, θ_s é umidade volumétrica em saturação, h é pressão aplicada, e α , n e m são constantes de ajuste.

A porosidade total (**Pt**) foi obtida a partir da relação entre a densidade do solo (**Ds**) e a densidade das partículas (**Dp**) (Danielson e Sutherland, 1986), de acordo com a equação :

$$Pt = 1 - D_s/D_p \quad (\%) \quad [6]$$

A microporosidade (**Mic**) foi obtida pela determinação da umidade retida a um potencial de 6,0 kPa ($Mic = \theta_{-6,0}$), sendo que a macroporosidade (**Mac**) ou porosidade de aeração, a rigor considerada como o volume de poros com ar na capacidade de campo, foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade. A capacidade de água prontamente disponível (**CAPD**) foi determinada pela diferença entre o conteúdo de água entre os potenciais de -6 e -100 kPa:

$$CAPD = \theta_{-6,0} - \theta_{-100} \quad (g/cm^3) \quad [7]$$

A densidade das partículas foi determinada através do uso de balão volumétrico e álcool etílico (EMBRAPA, 1979), e a densidade do solo foi determinada pela relação entre a massa seca a 110 °C e o volume da amostra (Blake e Hartge, 1980).

4.4.4 Determinação do Potencial Matricial da Água no Solo:

Foram instalados a campo 18 baterias de 5 tensiômetros cada uma. Cada conjunto de tensiômetros foi instalado em uma sub-parcela, nas profundidades de 10, 30, 50, 70, e 90 cm. Foram monitorados os tratamentos AsCT, AcC com e sem tráfego, BsCT e BcC com e sem tráfego, cada um com três repetições. Os preparos AsC e BsC ,ambos sem tráfego, não foram monitorados por serem condições pouco observadas na prática dos produtores.

Próximo ao experimento (50 m) havia uma estação meteorológica, com pluviômetro, termômetro e higrômetro, que proporcionaram leituras diárias destas variáveis.

As leituras de potencial de água no solo foram realizadas entre 18/09 e 18/10/91, em quatro períodos contínuos e subseqüentes, em função de limitações dos tensiômetros quando a umidade no solo tornava-se muito baixa (potenciais em torno de -70 kPa).

O resultado foi obtido através de leitura direta da coluna de mercúrio em régua dos tensiômetros, e transformada em potencial matricial de água no solo de acordo com a equação:

$$\psi_m = -12,6 \text{ ht} + z_1 + z_2 \quad [8]$$

onde ht é a altura da coluna de mercúrio (cm), z1 é a altura da cuba de mercúrio em relação ao solo, e z2 é a profundidade de instalação do tensiômetro, considerada a distância entre o ponto médio da cápsula e a superfície do solo.

4.5 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os preparos de solo e os níveis de tráfego foram dispostos nas parcelas, com dimensões de 40 x 50 m, e os níveis de calcário e diferentes profundidades foram dispostos nas sub-parcelas com dimensões de 20 x 50 m. Os tratamentos foram repetidos em três blocos ao acaso, compondo uma disposição SPLIT- PLOT para a análise dos dados de raízes (profundidades consideradas isoladamente) e porosidade, e SPLIT-SPLIT-PLOT para a análise da resistência à penetração (IC). A análise estatística dos dados foi realizada através do pacote estatístico SYSTAT.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (IC)

Os nossos resultados, com os valores de IC variando em função dos preparos iniciais, da aplicação de calcário, do tráfego, e das profundidades amostradas são visualizados nos gráficos 1 a 4, em perfis de isolinhas de resistência, e nas tabelas 5 a 8 estão os valores médios que os geraram, até a profundidade de 35 cm. Um resumo da análise de variância (TABELA 4) mostra que nos primeiros 5,0 cm de profundidade o efeito dos preparos, da calagem, das interações preparo + calagem, calagem+tráfego, e preparo+calagem+tráfego não foram estatisticamente significantes. Por outro lado, o efeito do tráfego e da interação preparo+tráfego foram altamente significantes ao nível de 0,1 e 1% de probabilidades. A análise de variância mostra que o efeito do tráfego, isoladamente, é sentido até 20 cm de profundidade, e na profundidade de 5 a 35 cm os efeitos do preparo e do calcário aparecem, ora isoladamente, ora em interação com o tráfego.

Considerando que trabalhamos com uma umidade padrão de 0,32 g/g, inferior à de Tormena (1991) que foi de 0,34 g/g, devemos diminuir nossos resultados, para efeito de comparação com aqueles ICs, em 0,8 MPa. Com esta redução, em função de uma umidade inferior quando da amostragem, observamos que o valor máximo de IC em linhas trafegadas foi de 2,2 Mpa na camada de 0-5 cm (TABELA-5). A evolução foi a seguinte: abril/90, IC de 1,6 MPa; maio/91, IC de 1,4 MPa; e outubro/91, IC igual a 2,2 Mpa.

O preparo inicial a 20 cm revelou-se o mais compactado em superfície devido ao tráfego: um IC máximo de 2,2 MPa, contra 1,7 MPa para o preparo inicial a 35 cm. Isto pode ser causado pelo efeito de confinamento das camadas adensadas em profundidade, ainda quando dos primeiros tráfegos sobre a área. Este IC de 2,2 MPa nos primeiros centímetros, acima do adotado como crítico ao crescimento e produção do trigo (Henderson, 1989), pode ser parcialmente contornado com a colocação das sementes em profundidade, o que as modernas máquinas de semear adequadas para o sistema de plantio direto já fazem.

Os valores de IC mostram que a incorporação do calcário fez com que o efeito da compactação fosse sentido em maior profundidade, provavelmente devido ao seu efeito inicial de desagregação do solo (Tama e El-Swaify, 1978). A variabilidade espacial parece estar influenciando os resultados e a análise de variância, e deve ser a causa das diferenças entre os tratamentos nas profundidades abaixo dos 35 cm. Apesar disso os gráficos mostram que o preparo com arado de aivecas a 35 cm apresenta valores de IC mais elevados na camada sub-superficial, até a profundidade de mobilização. Este comportamento concorda com o trabalho feito por Hamlett et al. (1989) que constataram que o efeito do tráfego limitou-se à zona de preparo. Também com o trabalho de Hill et al (1990) que observaram que, em condição de tráfego, o aumento na resistência foi menor em solo não preparado do que em solo preparado por aração a 23 cm, e que as diferenças na resistência decresceram com a profundidade, sendo grandemente dissipadas próximo a 35 cm, com o peso por eixo não tendo ultrapassado a 4,5 Mg, e também com Tormena (1991) que constatou a tendência do preparo com arado de aivecas sentir mais o efeito do tráfego entre 10-20 cm.

GRÁFICO-1: Perfil de Iso-Resistências para o tratamento AsC, em entre-linhas com e sem tráfego.

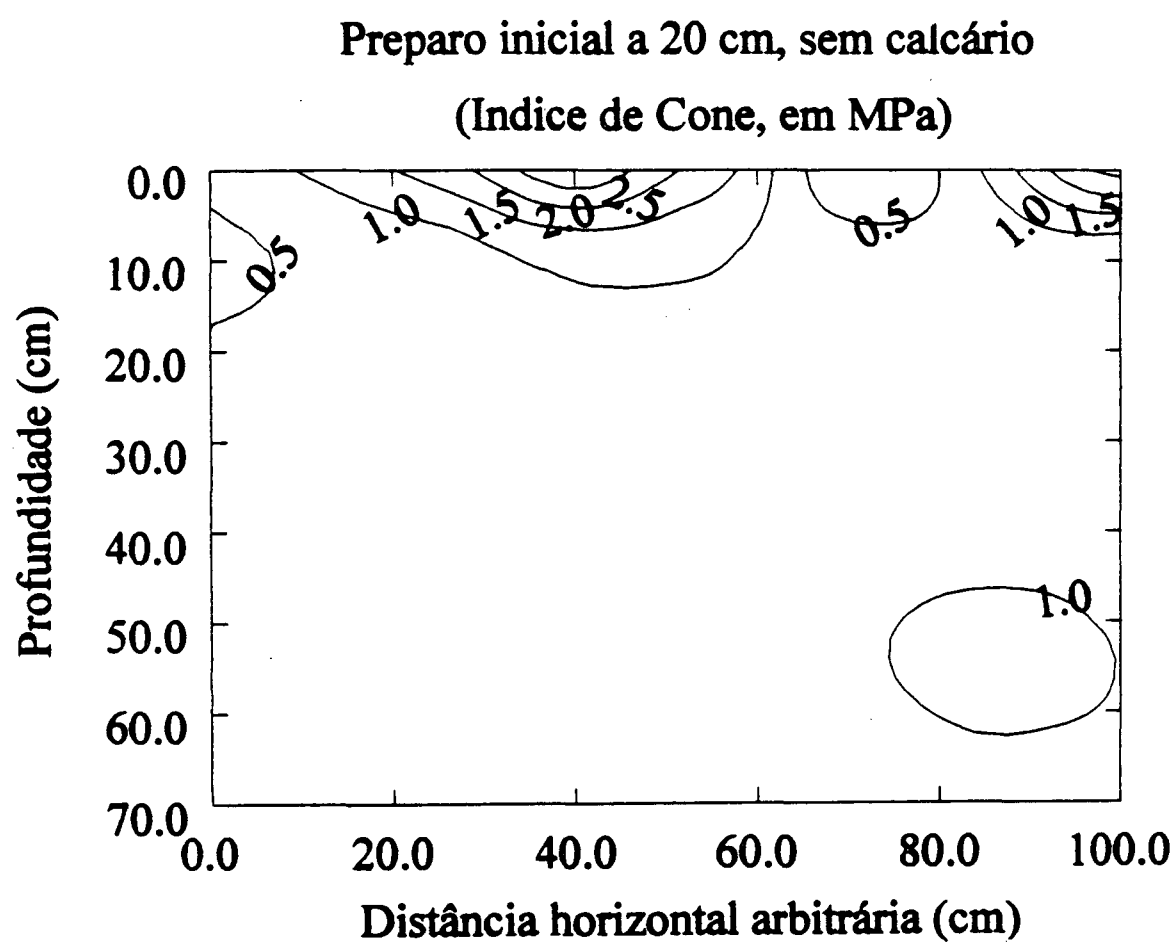


GRÁFICO-2: Perfil de Iso-Resistências para o tratamento AcC, em entre-linhas com e sem tráfego.

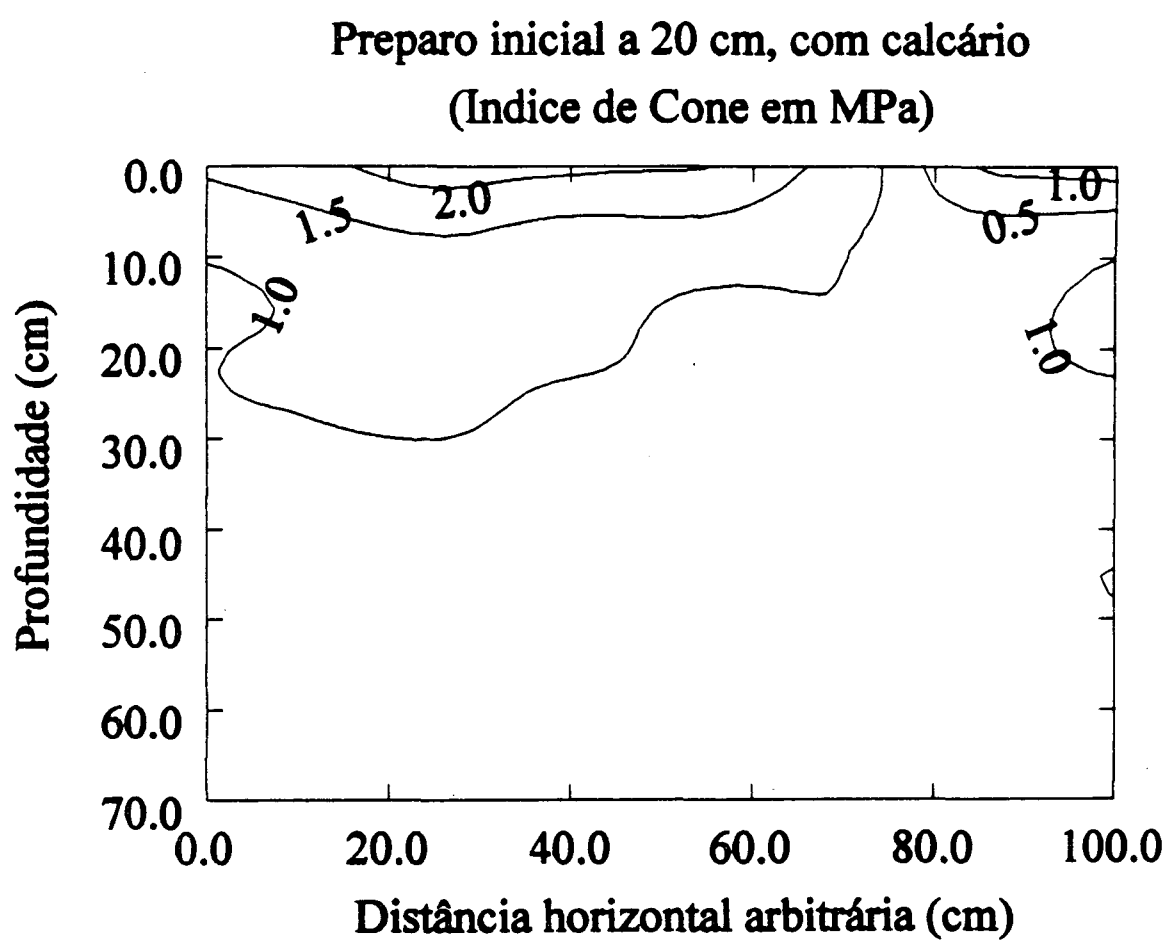


GRÁFICO-3: Perfil de Iso-Resistências para o tratamento BsC, em entre-linhas com e sem tráfego.

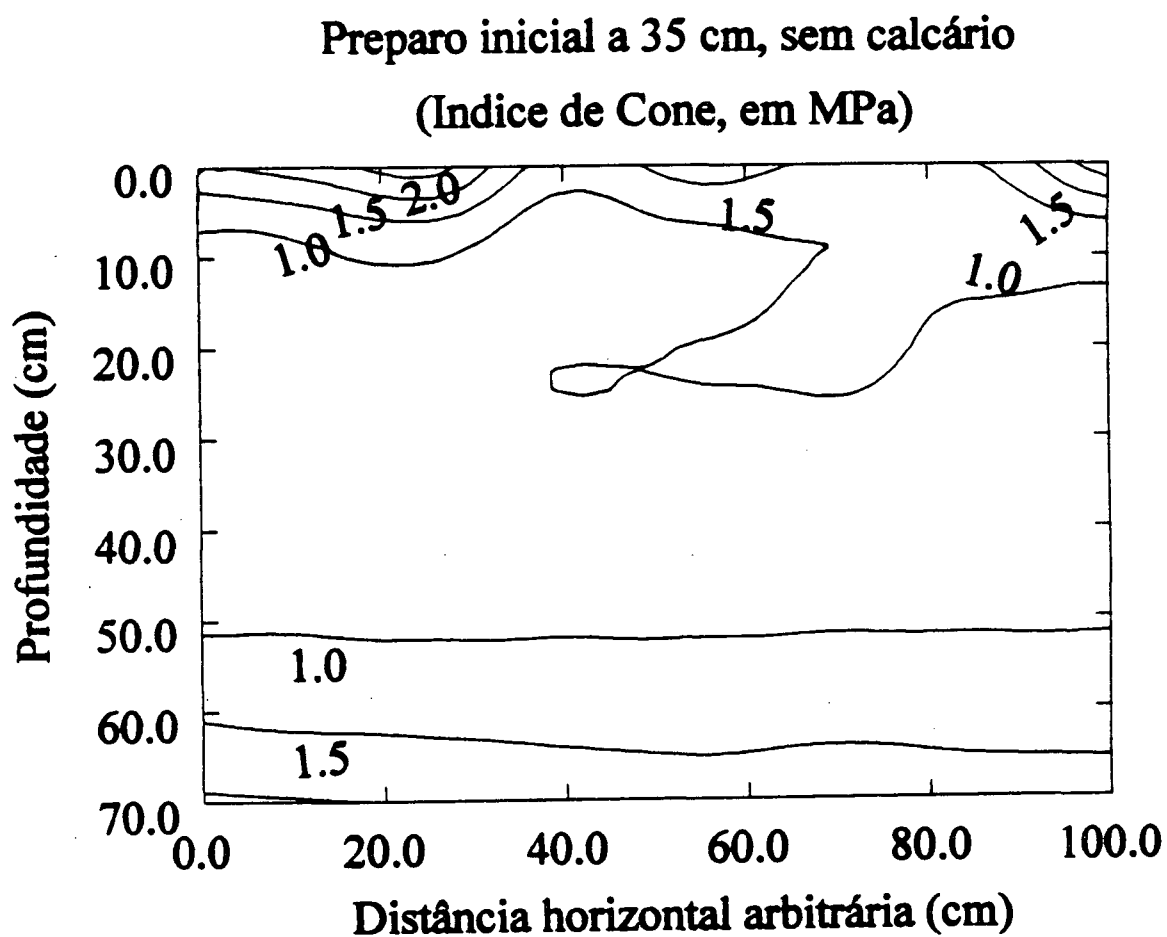


GRÁFICO-4: Perfil de Iso-Resistências para o tratamento BcC, em entre-linhas com e sem tráfego.

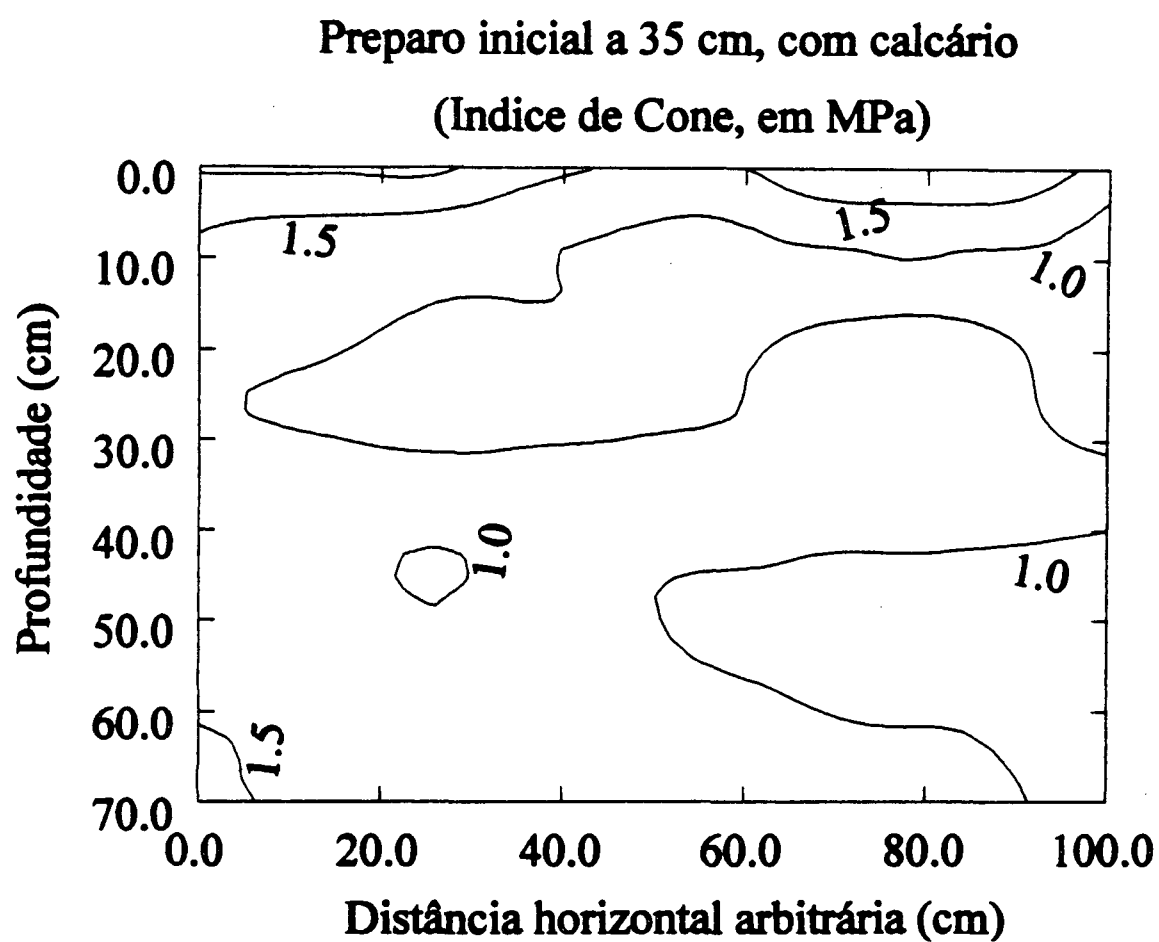


TABELA-4 RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO IC- VALOR P							
Prof.\Fat ores	Preparo	Calcário	Tráfego	Prep+Cal	Prep+Tr	Cal+Traf	Prep+Cal+ Traf
0-5 cm	0,274	0,498	***0,000	0,113	**0,005	0,547	0,135
5-10 cm	*0,032	* 0,026	***0,000	0,759	*0,013	0,375	0,795
10-15 cm	0,260	***0,000	***0,000	**0,009	**0,009	0,424	0,642
15-20 cm	0,269	***0,001	**0,033	0,854	0,412	0,173	0,330
20-25 cm	0,293	0,334	0,207	0,284	*0,031	0,108	0,303
25-30 cm	0,193	0,403	0,124	0,081	0,362	0,081	0,432
30-35 cm	**0,010	***0,000	0,720	**0,003	0,912	0,354	0,640
* Significativo ao nível de 5% ** Significativo ao nível de 1% *** Significativo ao nível de 0,1%							

TABELA-5: Valores de Índice de Cone (IC) em Mpa para o tratamento AsC, em entre-linhas com e sem tráfego							
Prof. (cm)	IC a	IC b	IC c	IC d	IC e	IC f	IC g
0-5	0,87	1,46	2,82	1,64	-----	-----	2,36
5-10	0,49	0,59	0,91	0,92	0,73	0,63	0,40
10-15	0,54	0,56	1,03	1,09	0,94	0,62	0,47
15-20	0,51	0,47	0,87	0,76	0,79	0,60	0,82
20-25	0,73	0,50	0,87	0,76	0,83	0,81	0,88
25-30	0,60	0,54	0,75	0,82	0,78	0,73	0,81
30-35	0,62	0,57	0,60	0,71	0,72	0,63	0,73

Valores médios de três repetições

As letras a a g indicam as entre-linhas amostradas.

TABELA-6: Valores de Índice de Cone (IC) em Mpa para o tratamento AcC, em entre-linhas com e sem tráfego							
Prof. (cm)	IC a	IC b	IC c	IC d	IC e	IC f	IC g
0-5	1,66	2,09	1,93	1,91	1,31	-----	-----
5-10	1,18	1,48	1,02	1,25	0,93	0,92	1,17
10-15	1,01	1,13	1,13	0,99	1,00	1,00	1,08
15-20	0,95	0,92	1,18	0,70	1,04	0,92	1,06
20-25	1,19	1,30	1,06	0,98	0,94	1,02	1,08
25-30	0,94	1,11	0,79	1,05	0,77	0,93	0,83
30-35	1,01	0,92	0,94	0,83	0,89	0,92	0,82

Valores médios de três repetições

As letras a a g indicam as entre-linhas amostradas

TABELA-7: Valores de Índice de Cone (IC) em Mpa, para o tratamento BsC, em entre-linhas com e sem tráfego.							
Prof. (cm)	IC a	IC b	IC c	IC d	IC e	IC f	IC g
0-5	1,84	2,57	0,96	1,67	1,30	1,25	2,55
5-10	0,65	0,94	0,33	0,59	0,84	0,90	0,70
10-15	0,93	0,95	0,59	0,94	1,08	1,07	1,03
15-20	0,84	0,77	0,71	0,93	1,06	0,95	0,94
20-25	0,97	0,77	1,24	1,18	1,12	0,97	0,91
25-30	0,90	0,76	1,08	0,90	1,04	0,84	0,89
30-35	0,66	0,61	0,65	0,79	0,81	0,73	0,80

Valores médios de três repetições

As letras a a g indicam as entre-linhas amostradas

TABELA-8: Valores de Índice de Cone (IC) em Mpa, para o tratamento BcC, em entre-linhas com e sem tráfego							
Prof. (cm)	IC a	IC b	IC c	IC d	IC e	IC f	IC g
0-5	1,90	2,64	1,44	1,22	1,83	2,53	-----
5-10	1,06	0,94	0,79	0,62	0,79	1,14	0,81
10-15	1,41	1,08	1,07	0,91	0,87	1,06	0,96
15-20	1,24	0,94	1,07	0,85	0,97	0,89	0,87
20-25	0,97	0,84	0,81	1,03	1,29	0,85	0,72
25-30	0,76	0,63	0,64	0,75	1,09	0,75	0,66
30-35	1,30	1,21	1,27	1,28	1,23	1,20	1,19

Valores médios de três repetições

As letras a a g indicam as entre-linhas amostradas

5.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Os resultados de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (Mic), macroporosidade (Mac), e capacidade de água prontamente disponível, determinados na camada de 15 a 25 cm de profundidade, em entre-linhas trafegadas, são apresentados na TABELA 9. A análise de variância destes resultados (TABELA A2) mostra que o efeito do preparo inicial não é sentido, o que confere com os resultados de Tormena (1991) ao constatar que até a profundidade de 35 cm os possíveis efeitos do preparo foram eliminados pelo tráfego, devido às magnitudes de cargas aplicadas pelas colheitadeiras

TABELA-9 Resultados da densidade do solo, porosidade total, micro e macro-porosidades, e capacidade de água prontamente disponível, aos 20 cm de prof., sob tráfego									
	Ds (g/cm ³)		Pt (cm ³ /cm ³)		Mic.(cm ³ /cm ³)		Mac.(cm ³ /cm ³)		CAPD (cm ³ /cm ³)
AcC	1,23	ns	0,514	ns	0,469	ns	0,045	ns	0,151 ns
AsC	1,09	ns	0,553	ns	0,458	ns	0,095	ns	0,149 ns
BcC	1,20	ns	0,510	ns	0,468	ns	0,042	ns	0,148 ns
BsC	1,19	ns	0,548	ns	0,466	ns	0,082	ns	0,15 ns

Os valores da densidade do solo obtidos em 05/91, na profundidade de 20 cm, aproximadamente 1,20 g/cm³, quando comparados com nossos resultados indicam que há uma tendência à estabilização da estrutura do solo e, até uma certa recuperação, provavelmente devido ao sistema radicular do trigo. Hill et al. (1990) concluíram que a maior diferença em densidade do solo, entre preparo convencional não trafegado e nenhum preparo com e sem tráfego ocorreu até a profundidade de 3,8 cm, e diminuiu com a profundidade. Hamlett et al. (1989) observaram que os efeitos da compactação na densidade do solo são claramente visíveis perto da superfície, mas abaixo de 25 cm não houveram diferenças significativas entre os tráfegos e não tráfegos, sendo que o efeito se limitou à zona de preparo. Isto é mais significativo em relação à porosidade de aeração, ou macroporosidade, que de um valor médio de 0,045 cm³/cm³ em 05/91, aumentou para 0,066 cm³/cm³ após a passagem da cultura do trigo na área. Ainda com relação à porosidade de aeração, apesar de a análise de variância não mostrar diferenças estatisticamente significativas, os resultados indicam que os tratamentos com calcário tendem a sentir mais os efeitos da compactação, provavelmente devido ao seu conhecido efeito inicial de desagregação. Este efeito é visível principalmente nos poros de aeração porque a compactação não altera o volume dos poros intra-agregados (Currie, 1984).

Quanto ao conteúdo de água prontamente disponível confirma-se que o tráfego eliminou os possíveis efeitos dos preparos até a profundidade de 20 cm, e que ocorreu um

pequeno acréscimo nos valores, passando de $0,11 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (média dos tratamentos com arado de discos e arado de aivéas, em 05/91), para $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ após a colheita do trigo.

Na TABELA-10 são mostrados os resultados das umidades volumétricas correspondentes a potenciais aplicados em laboratório, para a determinação das Curvas Características de Água no Solo.

TABELA-10: Umidades Volumétricas (cm^3/cm^3) aos 20 cm de prof., sob tráfego				
Potenciais (kPa)	AsC	AcC	BsC	BcC
-1	0,58 * ns	0,55 ns	0,57 ns	0,57 ns
-2	0,56 ns	0,53 ns	0,55 ns	0,55 ns
-4	0,50 ns	0,49 ns	0,50 ns	0,51 ns
-6	0,46 ns	0,47 ns	0,47 ns	0,47 ns
-10	0,39 ns	0,41 ns	0,41 ns	0,41 ns
-33	0,35 ns	0,36 ns	0,36 ns	0,36 ns
-100	0,31 ns	0,32 ns	0,32 ns	0,32 ns
-300	0,29 ns	0,30 ns	0,30 ns	0,30 ns

*Valores médios de três repetições

A proximidade dos valores encontrados faz com que ao se produzirem as curvas características, estas fiquem praticamente sobrepostas, o que também vem demonstrar o efeito do tráfego sobrepujando possíveis efeitos de preparo inicial do solo. Apesar de não serem estatisticamente significantes, as menores quantidades de água retidas em baixos potenciais (-1 e -2 kPa), no tratamento AcC (preparo inicial a 20 cm, com calcário) indicam que o calcário fez com que o efeito do tráfego aumentasse a compactação. Em condições de saturação a quantidade de água retida pelo solo diminui com a compactação, seguindo a diminuição da porosidade total (Camargo, 1993).

Observando-se as produtividades obtidas nos diversos tratamentos (TABELA-11) conjuntamente com os valores dos parâmetros físicos analisados, têm-se que não se atingiu nenhuma mudança detrimental nas condições físicas para o crescimento das plantas, quer pelos preparos, quer pelo tráfego. Hill et al. (1990) estudando o efeito do tráfego sobre propriedades físicas do solo, sob diferentes sistemas de preparo, chegaram à mesma conclusão, sendo que o peso por eixo das máquinas, em seu experimento não excedeu a 4,5 Mg.

A estabilização da estrutura demonstrada pelos valores obtidos, que não tiveram agravamento quando comparados aos últimos resultados observados por Tormena(1991), concordam com Soane et al (1982) quando sugere que um solo em Plantio Direto torna-se pré-compactado e depois disso é suficientemente resistente para suportar tráfegos sem aumentar a compactação. As boas produtividades nos diversos tratamentos-- apesar de ter-se encontrado valores tidos como impeditivos ao desenvolvimento de raízes pela literatura, tal como os de porosidade de aeração, que estiveram bem abaixo do valor de $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ considerado pela literatura como limite mínimo para que se tenha taxa aceitável de difusão gasosa, e tal como os valores de IC tidos como detrimenais ao crescimento radicular-- mostram que a cultura sob Plantio Direto encontrou condições para desenvolver-se bem, provavelmente devido à ocorrência de poros grandes, estáveis e contínuos que não são determináveis pela metodologia empregada.

TABELA-11: Produtividade (Kg/ha) da cultura do Trigo sob Plantio Direto Fonte: Fundação ABC					
AsCT	2905		BsCT	2780	
AcCT	2286		BcCT	2751	
AcC	2720		BcC	2615	
média	2637	ns	média	2715	ns

Cultivar: BR-23

Data de plantio: 03/06/91

Adubação: 100 Kg/ha de Kcl

Densidade: 55 pl/m

Para a análise de variância dos dados de produtividade consideramos apenas dois tratamentos (preparo A e preparo B), por ser a variedade BR-23 resistente à saturação de Al^{+3} ($>20 <35\%$) e, conforme mostra a tabela 3, a área antes da instalação do experimento não tinha valores de m% maiores que 33,7. Isto explica as maiores produtividades nos tratamentos sem calcário adicional. Considerando o preparo A (20 cm de profundidade), o tratamento que conjugou tráfego e calcário (AcCT) apresentou produtividade 18,7% menor que a média dos demais, o que novamente indica o efeito negativo do tráfego em seguida à calagem.

5.3: PARÂMETROS RADICULARES

Os resultados são apresentados nas TABELAS 12, 13 e 14, e um resumo da análise estatística é mostrada na TABELA 15.

TABELA-12 : Massa seca de raízes em g/cm ³ de solo						
Tratamentos	AcCT	AcC	AsCT	BcCT	BcC	BsCT
Profundidade						
0-10 cm	0,11	0,08	0,11	0,09	0,12	0,08
10-20 cm	0,03	0,04	0,03	0,03	0,01	0,02
30-40 cm	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
50-60 cm	0,02	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01
70-80 cm	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01

Valores médios de 3 repetições

TABELA-13: Densidade de comprimento de raízes em cm/cm ³ de solo						
Tratamentos	AcCT	AcC	AsCT	BcCT	BcC	BsCT
Profundidade						
0-10 cm	5,48	3,33	6,34	4,28	9,81	4,39
10-20 cm	1,13	1,39	1,31	1,07	0,98	1,00
30-40-cm	1,15	0,76	0,97	0,83	0,81	1,06
50-60 cm	0,77	0,77	1,07	0,90	1,09	0,80
70-80 cm	0,68	0,68	0,82	0,78	0,56	0,52

Valores médios de 3 repetições

TABELA-14 Raio médio das raízes em mm						
Tratamentos	AcCT	AcC	AsCT	BcCT	BcC	BsCT
Profundidade						
0-10 cm	0,24	0,25	0,23	0,24	0,20	0,21
10-20 cm	0,15	0,17	0,10	0,13	0,13	0,20
30-40 cm	0,13	0,15	0,10	0,16	0,14	0,15
50-60 cm	0,13	0,09	0,13	0,12	0,17	0,15
70-80 cm	0,10	0,13	0,14	0,16	0,11	0,14

Procedeu-se à análise estatística separadamente com relação ao efeito do tráfego e do calcário: uma primeira análise considerou o efeito do preparo e do tráfego, sempre com calcário adicional; outra análise considerou o efeito do calcário e do preparo, sempre sob tráfego.

TABELA-15 Resumo da Análise da Variância dos Parâmetros Radiculares- valor P						
Fatores/ Variáveis	Preparo	Tráfego	Prep+Traf	Preparo	Calcário	Prep+Calc
	Com Calcário			Com Tráfego		
Massa seca						
0-10 cm	0,837	0,945	0,470	0,404	0,936	0,812
10-20 cm	*0,037	0,430	0,203	0,537	0,537	0,405
30-40 cm	*0,037	0,631	0,631	0,373	1,000	0,650
50-60 cm	0,248	0,297	0,169	*0,040	0,438	0,438
70-80 cm	0,242	0,242	0,242	0,282	0,282	0,282
Comprimento						
0-10 cm	0,126	0,269	0,155	0,298	0,729	0,790
10-20 cm	0,245	0,679	0,379	0,400	0,810	0,565
30-40 cm	0,421	0,183	0,106	0,513	0,907	0,247
50-60 cm	0,314	0,678	0,678	0,516	0,338	*0,072
70-80 cm	0,970	0,546	0,546	0,546	0,735	0,253
Raio médio						
0-10 cm	0,707	0,791	0,557	0,571	0,341	0,323
10-20 cm	0,197	0,615	0,510	0,213	0,691	0,109
30-40 cm	0,824	0,864	0,216	*0,018	0,255	0,624
50-60 cm	0,386	0,735	0,234	0,902	0,633	0,515
70-80 cm	0,121	0,374	*0,010	*0,061	0,669	0,207

* Significativo ao nível de $P \leq 0,5$

Os tratamentos não diferiram estatisticamente em superfície (0-10 cm) em nenhum dos parâmetros analisados, em nenhuma das condições de análise.

A primeira análise (preparo e tráfego, com calcário) mostrou que na profundidade entre 10-40 cm, o efeito do preparo foi significativo para o parâmetro massa seca: foi maior no preparo com arado de discos a 20 cm (TABELA 12: $0,06 \text{ g/cm}^3$, na média dos tratamentos) do que no preparo com arado de aivéas a 35 cm ($0,04 \text{ g/cm}^3$). Entre 70-80 cm de profundidade, a análise estatística mostra o efeito da interação preparo+tráfego sobre o raio médio das raízes,

sendo que no preparo inicial a 35 cm as raízes apresentaram diâmetros maiores: 0,16 mm contra 0,11 mm das raízes sob preparo a 20 cm.

A análise que considerou o efeito do preparo e do calcário, sob tráfego, mostrou que ocorreram diferenças significativas entre os preparos sobre o raio médio das raízes, nas profundidades entre 30-40 cm e 70-80 cm. Os maiores valores se encontraram nas raízes sob preparo com aivecas, a 35 cm (TABELA 14: 0,15 mm contra 0,11 mm). O efeito do preparo também aparece na matéria seca entre 50-60 cm, sendo maior, agora, no preparo com arado de discos: 0,025 g/cm³ contra 0,01 g/cm³. Ainda na camada entre 50-60 cm aparece o efeito da interação preparo+calcário na densidade de comprimento, sendo maior no preparo com arado de aivecas: 0,90 contra 0,77 cm/cm³.

Apesar de o método de avaliação utilizado acumular erros nas medições, os resultados mostram que não foi sentido o efeito dos preparos, do tráfego e do calcário em nenhum dos parâmetros, na profundidade de 0-10 cm. A partir de 10 cm de profundidade aparecem diferenças significativas: a) entre 10-60 cm a massa seca é maior para o preparo com arado de discos a 20 cm. b) o raio médio das raízes apresentou-se maior nas camadas 30-40 cm e 70-80 cm, quando sob preparo inicial mais profundo (aivecas a 35 cm). Graham et al. (1986) estudando o efeito da compactação no crescimento das raízes de trigo de inverno sob Plantio Direto, constataram que o tratamento submetidos à média pressão (93 kPa) tendeu a apresentar mais raízes entre 10-40 cm, quando comparado com tratamentos onde não houve tráfego ou no tratamento onde o tráfego causou alta pressão (118 kPa), mas tal diferença só foi significativa entre 30-40 cm. Russel (1977) supõe que, na realidade, quando as raízes encontram obstáculos (diâmetros de poros do solo menores que o seu próprio) ao seu crescimento sofrem um aumento em seus diâmetros. Nossos resultados vêm de encontro a estas afirmações, considerando que o maior efeito do tráfego ocorreu em superfície (10 cm) eliminando possíveis diferenças entre os preparos, e que em profundidades maiores seu efeito foi mais sentido no preparo que mais mobilizou o solo, coerentemente à resultados antes comentados. Da mesma forma, a análise estatística mostra que a

compactação causada pelo tráfego não teve efeito significativo no crescimento das raízes, apesar que os resultados de massa seca e densidade de comprimento, na camada de 0-10 cm, no preparo com aivecas, são maiores em condição de tráfego zero. O fato de este mesmo comportamento não ter sido observado sob o preparo com arado de discos pode ser devido ao fato de que para este tratamento, na profundidade de 0-10 cm, trabalhamos com o resultado de apenas uma amostra, sem repetições, devido a amostras perdidas.

5.4: POTENCIAIS MATRICIAIS

Ao longo de quatro períodos descontínuos determinamos a campo, por meio de tensiômetros, a variação do potencial matricial em diferentes profundidades.

Para o primeiro período de leituras (1.1, 1.2, e 1.3) que compreendeu os dias 18 a 20/09, em virtude de o solo estar muito seco usamos a média das duas leituras diárias para todas as profundidades. Uma precipitação de 122 mm distribuída entre 23/09 e 02/10 reumedeceu o solo, resultando em valores de potencial matricial mais baixos para o segundo período de leituras, correspondente aos dias 03 e 04/10 (2.1, 2.2, 2.3, 2.4-leituras pela manhã e à tarde). Uma segunda recarga de água no solo ocorreu nos dias 05 e 06/10, somando 77 mm. Após esta precipitação iniciou-se o terceiro período de leituras, compreendido entre 07 e 09/10 (3.1 a 3.5). Durante este período os coeficientes de variação tiveram um comportamento distinto: Nas profundidades de 10 e 30 cm tiveram os mais baixos valores, indicando um melhor funcionamento dos tensiômetros. Tal situação se modificou nas profundidades de 50 e 70 cm, quando os valores dos desvios padrões aumentaram substancialmente, tendo por vezes superado as leituras. Provavelmente isto deve-se ao chamado efeito “curto circuito”, quando a água chega à cápsula escorrendo diretamente pelas paredes dos tensiômetros que foram instalados verticalmente ao solo, ou através de macroporos contínuos a partir da superfície. Nestas profundidades maiores devido à dificuldade de instalação e às rachaduras que o solo sofreu, os tensiômetros podem ter apresentado vazios

entre paredes/solo, o que fez com que as fortes chuvas de 05 e 06/10 se fizessem sentir por parte de água que, indevida e rapidamente, atingiu as cápsulas permeáveis. Canais feitos pela mesofauna, principalmente por besouros (corós) também foram constatados com frequência nas parcelas. Depois de voltar a chover nos dias 09 e 10/10 (29 e 19 mm respectivamente), iniciamos o quarto período de leituras, compreendido entre os dias 15 a 17/10.

Desprezamos os resultados obtidos no primeiro período de leituras porque os tensiômetros trabalharam no limite de sua capacidade, e por isso algumas leituras não puderam ser feitas. Também são pouco confiáveis os valores obtidos no terceiro e quarto períodos, nas profundidades de 50, 70, e 90 cm, em virtude dos altos coeficientes de variação. Em anexo, nas TABELAS A3 à A7 são mostrados os valores médios dos potenciais matriciais juntamente com as médias dos coeficientes de variação, por período.

Nas profundidades de 10 e 30 cm, nos períodos 2 e 3, de maior disponibilidade de água, foi possível fazer uma análise dos resultados, que são mostrados nas TABELAS 16 e 17, e nos respectivos GRÁFICOS 5 e 6:

TABELA-16: Potenciais matriciais (kPa) na profundidade de 10 cm leituras pela manhã e à tarde						
Períodos (dias)	AsCT	AcCT	AcC	BsCT	BcCT	BcC
2.1	11,0 *	12,8	10,6	12,1	13,5	10,2
2.2	13,9	17,1	12,4	15,0	16,6	12,7
2.3	16,1	19,9	14,3	17,3	19,3	14,9
2.4	21,6	26,3	19,5	23,3	25,5	18,5
3.1	9,2	10,7	8,5	9,4	10,2	8,6
3.2	10,8	12,2	10,1	10,9	11,4	10,2
3.3	11,7	13,6	10,9	12,2	15,7	11,1
3.4	8,9	8,7	5,5	8,8	8,3	7,6
3.5	2,0	1,9	3,1	2,1	2,8	2,7

*Valores médios de 3 repatições

Na profundidade de 10 cm (gráfico) observa-se o efeito do tráfego na capacidade de armazenamento de água. Os tratamentos com tráfego AcCT e BcCT à medida que o solo vai secando assumem os mais altos potenciais. Ao contrário, os tratamentos BcC e AcC

permaneceram com os mais baixos potenciais, contando com mais água disponível. O fato de as extremidades serem ocupadas conjuntamente com os preparos A e B, no período 2, confirma que o efeito do tráfego anulou possíveis diferenças entre eles.

TABELA-17: Potenciais matriciais (kPa) na profundidade de 30 cm leituras pela manhã e à tarde						
Períodos	AsCT	AcCT	AcC	BsCT	BcCT	BcC
2.1	28,9 *	29,7	24,6	26,2	24,0	25,2
2.2	30,0	31,9	24,9	28,0	27,8	26,1
2.3	31,8	34,2	25,1	29,2	25,1	27,2
2.4	32,2	34,7	25,8	31,5	31,1	28,2
3.1	10,6	13,1	10,8	11,4	10,2	9,9
3.2	12,1	13,6	11,5	12,6	11,1	11,2
3.3	12,7	14,2	12,4	13,6	12,2	11,8
3.4	14,8	15,6	12,8	14,7	13,6	12,4
3.5	13,2	15,4	12,8	10,0	12,5	11,8

*Valores médios de três repetições

Na profundidade de 30 cm, no período 2, também se observa o efeito da compactação conferindo mais água disponível nos tratamentos sem tráfego. A maior amplitude que se verifica entre os tratamentos AcC e AcCT confirma que o efeito do tráfego foi mais sentido neste preparo

GRÁFICO-5: Variação dos Potenciais Matriciais (kPa) na profundidade de 10 cm

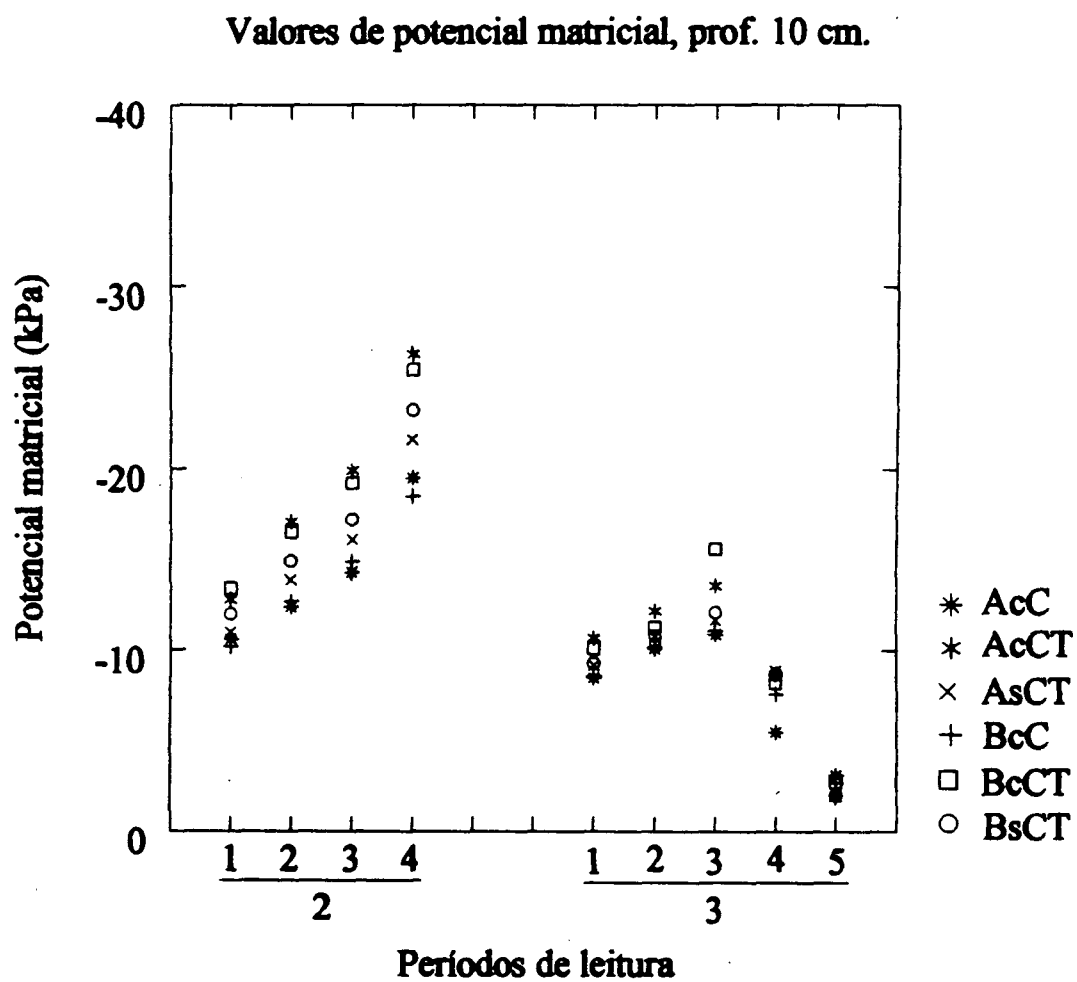
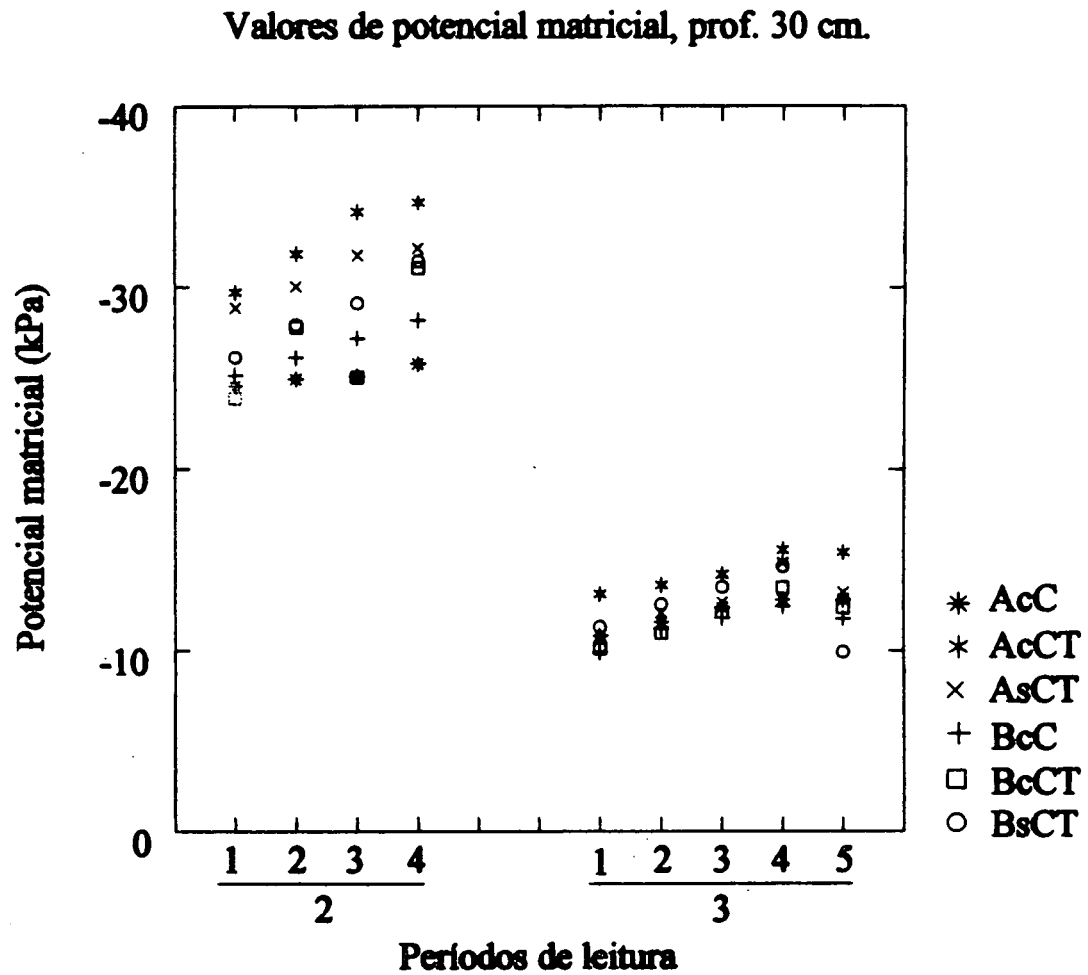


GRÁFICO-6: Variação dos Potenciais Matriciais (kPa) na profundidade de 30 cm



6: CONCLUSÕES

6.1) Os resultados mostram que o tráfego é fator preponderante sobre a compactação, agindo até aos 20 cm., eliminando diferenças entre os preparos iniciais. Há uma tendência de o preparo mais superficial apresentar maior resistência à penetração nos primeiros 5,0 cm, enquanto que o preparo mais profundo tende a transmitir a compactação até a zona de mobilização, ou seja, o preparo inicial a 35 cm fez com que a compactação fosse maior abaixo de 20 cm de profundidade.

Os resultados mostram que o preparo inicial a 35 cm não apresentou vantagem sobre o preparo a 20 cm. Isto é bastante significativo, haja vista o menor custo do preparo com arado de discos, mobilizando-se apenas 20 cm de solo, além da maior rapidez na operação. Outro aspecto a ser considerado diz respeito à incorporação do calcário, que ao se restringir aos primeiros 20 cm implica em menores quantidades para se atingir o nível de saturação de bases desejado.

O efeito do tráfego foi potencializado pela ação do calcário, principalmente sob o preparo mais superficial. É o que revelam os resultados de resistência à penetração, mostrando que a compactação foi mais sentida em profundidade nesta condição, refletindo na menor aeração (macroporosidade) aos 20 cm de profundidade.

6.2) Os parâmetros radiculares não indicaram impedimento ao crescimento das raízes devido ao tráfego. O preparo inicial mais superficial apresentou maior massa seca de raízes entre 10 e 60 cm, enquanto que as raízes apresentaram diâmetros maiores nas camadas abaixo de 20 cm sob o preparo inicial a 35 cm, justamente o que transmitiu a compactação mais profundamente.

6.3) A avaliação da porosidade na camada de 15-25 cm mostra que, mesmo sob tráfego, não se agravou o processo de adensamento do solo quando se comparam com os resultados obtidos antes da cultura do trigo. Ao contrário, houve pequeno aumento da porosidade de aeração e da capacidade de água prontamente disponível.

Sugere-se para pesquisas futuras que se restrinja a camada de estudo aos primeiros 30 cm, e que se aumente o número e a frequência das observações. Nossos resultados mostram que os efeitos do tráfego limitaram-se à zona de preparo, e os altos coeficientes de variação na determinação dos potenciais matriciais a campo, resultam da dificuldade de funcionamento dos tensiômetros em profundidades maiores, além da variabilidade espacial existente.

ANEXOS

TABELA-A1: Análise de Variância para os valores de IC graus de liberdade total=23								
Prof.	Fatores	Preparo	Calcário	Tráfego	Prep+Calc	Prep+Tráf	Calc+Tráf	Prep+Calc+Tráf
0-5 cm	QM	0,348	0,131	20,480	0,760	2,933	0,103	0,670
	F	1,284	0,482	75,584	2,803	10,823	0,370	2,472
	P	0,274	0,498	***0,0	0,113	**0,005	0,547	0,135
5-10 cm	QM	0,160	0,173	0,634	0,003	0,224	0,024	0,002
	F	5,533	5,994	21,907	0,097	7,752	0,832	0,070
	P	*0,032	*0,026	***0,0	0,759	*0,013	0,375	0,795
10-15 cm	QM	0,023	0,322	0,443	0,147	0,147	0,011	0,004
	F	1,362	19,22	26,437	8,792	8,792	0,673	0,224
	P	0,260	***0,0	***0,0	**0,009	0,009**	0,424	0,642
15-20 cm	QM	0,040	0,505	0,167	0,001	0,022	0,062	0,031
	F	1,313	16,56	5,469	0,035	0,709	2,035	1,011
	P	0,269	***0,001	**0,033	0,854	0,412	0,173	0,330
20-25 cm	QM	0,038	0,032	0,055	0,039	0,179	0,093	0,036
	F	1,181	0,990	1,730	1,231	5,606	2,905	1,132
	P	0,293	0,334	0,207	0,284	0,031*	0,108	0,303
25-30 cm	QM	0,044	0,018	0,063	0,083	0,021	0,083	0,016
	F	1,851	0,737	2,640	3,469	0,880	3,469	0,649
	P	0,193	0,403	0,124	0,081	0,362	0,081	0,432
30-35 cm	QM	0,180	1,233	0,003	0,260	0,000	0,019	0,005
	F	8,525	58,313	0,133	12,315	0,013	0,911	0,228
	P	**0,01	***0,	0,720	**0,003	0,912	0,354	0,640

TABELA-A2: Análise de Variância dos Parâmetros: densidade do solo (DS), porosidade total (PT), microporosidade (MIC), macroporosidade (MAC), e capacidade de água prontamente disponível (CAPD), na camada de 15-25 cm de profundidade, sob tráfego. Graus de liberdade total=11				
Fatores	QM	GL	F	P
DS				
Preparo	0,003	1	0,510	0,495 ns
Calcário	0,016	1	2,762	0,135 ns
Prep+Calcário	0,014	1	2,417	0,159 ns
PT				
Preparo	0,000	1	0,040	0,847 ns
Calcário	0,004	1	1,652	0,235 ns
Prep+Calcário	0,000	1	0,019	0,894 ns
MIC				
Preparo	0,000	1	0,127	0,731 ns
Calcário	0,000	1	0,127	0,731 ns
Prep+Calcário	0,000	1	0,032	0,863 ns
MAC				
Preparo	0,000	1	0,101	0,750 ns
Calcário	0,005	1	1,175	0,310 ns
Prep+Calcário	0,000	1	0,034	0,858 ns
CAPD				
Preparo	0,000	1	0,023	0,883 ns
Calcário	0,000	1	0,023	0,883 ns
Prep+Calcário	0,000	1	0,023	0,883 ns

TABELA A3: Valores de ψ_m (cm de coluna de água) e coeficientes de variação (médias por períodos) na profundidade de 10 cm

Período	BsCT	BCT	BCsT	AsCT	ACT	ACsT
1.1	618	636 37	728	738	595	589
1.2	672 9%	680 4%	747 4%	748 7%	645 4%	632 5%
1.3	705	714				
2.1	121	135	102	110	128	106
2.2	150	166	127	139	171	124
2.3	173 17%	193 22%	149 9%	161 13%	199 14%	143 12%
2.4	233	255	185	216	263	195
3.1	94	102	86	92	107	85
3.2	109	114	102	108	122	101
3.3	122 13%	157 22%	111 5%	117 5%	136 4%	109 4%
3.4	88	83	76	89	87	55
3.5	21	28	27	20	19	31
4.1	532	552	439	513	531	523
4.2	571	608	535	562	571	579
4.3	492 20%	636 20%	553 8%	631 15%	617 17%	622 19%
4.4	608	681	612	666	646	668
4.5	596	695	653	598	667	689
4.6	681	706	672	588	669	738

TABELA-A4: Valores de ψ_m (cm de água) e coeficientes de variação para a profundidade de 30 cm

Períodos	BsCT	BCT	BCsT	AsCT	ACT	ACsT
1.1	656		250	626	459	446
1.2	703 7%		610 25%	676 10%	537 54%	659 32%
1.3	737					
2.1	262	240	252	289	297	246
2.2	280 13%	278 27%	261 21%	300 16%	319 34%	249 33%
2.3	292	251	272	318	342	251
2.4	315	311	282	322	347	258
3.1	114	102	99	106	131	108
3.2	126	111	112	121	136	115
3.3	136 17%	122 12%	118 14%	127 8%	142 16%	124 8%
3.4	147	136	124	148	156	128
3.5	100	125	118	132	154	128
4.1	188	177	169	185	198	165
4.2	242	228	229	229	239	214
4.3	228 21%	217 10%	219 21%	225 9%	247 8%	201 8%
4.4	292	285	288	282	299	261
4.5	213	276	296	280	322	263
4.6	297	313	327	300	339	289

TABELA-A5: Valores de ψ_m e coeficientes de variação (médias por períodos) aos 50 cm						
Períodos	BsCT	BCT	BCsT	AsCT	ACT	ACsT
1.1	549	478	564	624	280	601
1.2	610 9%	530 4%	617 14%	675 26%	337 98%	637 3%
1.3	648					
2.1	448	361	500	420	454	448
2.2	482 10%	380 26%	453 27%	452 12%	417 19%	485 12%
2.3	537	415	540	485	429	537
2.4	545	428	454	508	446	539
3.1	498	395	497	428	265	384
3.2	401 65%	284 33%	459 61%	365 68%	234 63%	181 9%
3.3	368	244	444	341	228	158
3.4	297	170	373	344	213	137
3.5	295	162	361	315	211	137
4.1	192	129	140	148	108	132
4.2	213	160	188	176	135	191
4.3	216 28%	158 14%	178 25%	183 10%	129 40%	165 3%
4.4	256	200	229	227	235	233
4.5	208	211	231	232	252	231
4.6	276	214	251	247	2499	252

TABELA-A6: Valores de ψ_m e coef. de variação (médias por períodos) aos 70 cm						
Períodos	BsCT	BCT	BCsT	AsCT	ACT	ACsT
1.1	512	362	598	569	198	459
1.2	571 9%	438 33%	620 10%	619 14%	203 158%	528 38%
1.3	626	476				
2.1	221	398	478	488	395	512
2.2	236	419	518	528	458	560
2.3	268 91%	454 57%	576 4%	594 4%	485 62%	620 7%
2.4	263	459	594	611	296	626
3.1	282	466	577	563	360	701
3.2	284	472	587	552	343	708
3.3	281 114%	472 63%	585 24%	552 62%	345 125%	705 4%
3.4	280	483	600	483	350	705
3.5	278	482	597	451	288	704
4.1	305	165	376	350	395	495
4.2	291	170	363	340	410	475
4.3	296 67%	125 44%	340 35%	338 44%	401 81%	438 43%
4.4	297	151	326		402	425
4.5	214	165	291	216		
4.6	284	177	285	207		

TABELA-A6: Valores de ψ_m e coef. de variação (médias por períodos) aos 90 cm						
Períodos	BsCT	BCT	BCsT	AsCT	ACT	ACsT
1.1	475	328	377	532	474	412
1.2	524 30%	397 57%	425 48%	566 16%	526 30%	279 21%
1.3	574	406		606		
2.1	463	447	509	508	538	457
2.2	506 25%	491 21%	552 13%	544 10%	410 41%	483 26%
2.3	571	556	611	592	490	521
2.4	574	563	621	602	499	517
3.1	649	647	535	655	589	573
3.2	676	673	538	670	611	581
3.3	674 7%	656 12%	532 54%	669 5%	610 21%	577 18%
3.4	672	660	518	664	620	581
3.5	667	661	519		619	584
4.1	344	546	449		345	564 24%
4.2	344	533	445		523	549
4.3	374 95%	486 48%	355 95%		541 39%	
4.4	426	491	352		534	
4.5	143			184 40%		
4.6	149			240		

TABELA-A7: Valores de umidade (g/cm^3) para correção dos ICs, com tráfego				
Profundidade (cm)	AsC	AcC	BsC	BcC
0-5	0,28	0,32	0,29	0,30
5-10	0,29	0,33	0,29	0,30
10-15	0,29	0,31	0,30	0,28
15-20	0,30	0,30	0,31	0,28
20-25	0,30	0,32	0,31	0,28
25-30	0,30	0,32	0,31	0,28
30-35	0,31	0,33	0,32	0,35

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akram, M. e W. D. Kemper. Infiltration of soils as affected by the pressure and water content at the time of compaction. Soil Science Society of America Journal, 1979, 43:1080-1086.
- Allmaras, R. R. et al. Long term cultivation effects on hydraulic properties of a Walla-Walla silt loam. Soil and Tillage Research, 1982, 2:265-279
- Aubertin, G. M. e L. T. Kardos Root growth through porous media under controlled conditions II. Effects of pore size and rigidity. Soil Science Soc. Am. Proc., 1965, 29:290-293
- Barley, K. P. Mechanical resistance of the soil in relation to the growth of root and emerging shoots. Agrochimica, 1976, 20:173-182
- Beven, K. e P. Germann Water flow in soil macropores II. A combined flow model. Journal of Soil Science, 1981, 32:15-29
- Beven, K. e P. Germann Macropores and water flow in soils. Water Resources Research, 1982, 18:1311-1325
- Blackwell, P. S. et al. Evaluation of soil compaction by transverse whelling of tillage slots. Soil Science Society of America Journal, Madison, 1989, 53:1:11-15
- Bohm, W. Methods of studying root systems. Berlin: Springer Verlag, 1979, 189 p.
- Bouma, J. et al. Water infiltration and redistribution in a silt loam subsoil with vertical worm channels. Soil Sci. Soc. of Am. Journal, 1982, 46:1917-1921
- Bowen, H. D. Alleviation mechanical impedance. In Modifying the root environment to reduce crop stress. American Society of Agriculture Engineer, 1981, G. F. Arkin e H. M. Taylor (ed.), St. Joseph, Michigan, pp. 21-57
- Camargo, A. O. Compactação do solo e desenvolvimento de plantas. Fundação Cargill, Campinas, 1983, pp. 18-21

- Campbell, R. e R. Porter Low temperature scanning electron microscopy of micro-organisms in soil. Soil Biology and Biochemistry, 1982, 14:241-245
- Cannel, Q. R. e M. B. Jackson Alleviating aeration stress. In: Arkin, G. F. e G. M. Taylor Modifying the root environment to reduce crop stress. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981, pp.141-180
- Carter, M. R. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. Soil Tillage Research, 1988, 12:37-51
- Cassel, D. K. et al. An evaluation of mechanical impedance for three tillage treatments on Norfolk sandy loam. Soil Science Soc. of Am. Journal, 1978, 42:116-120
- Cassel, D. K. Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. In Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. American Society of Agronomy, 1982, pp. 145-167
- Cassel, D. K. Spatial and temporal variability of soil physical properties following tillage of Norfolk loamy sand. Soil Science Soc. of Am. J., 1983, 47:196-205
- Cassel, D. K. Effects of plowing depth incorporation of lime and phosphorous upon physical and chemical properties two coastal plain after 15 years. Soil Science Soc. of Am. Journal, 1980, 42:116-120
- Cintra, F. L. D. e J. Mielniczuck Potencial de algumas espécies vegetais para recuperação de solos degradados. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 1983, 7:323-327
- Comin, Jucinei José Desenvolvimento radicular do milho e da soja em um latossolo vermelho escuro após a implantação do plantio direto. . Dissertação como requisito para Mestrado em Agronomia-Área de concentração em Ciência do Solo-UFPR-Curitiba, 1991
- Corrêa, J. C. Características físicas de um Latossolo amarelo muito argiloso Pesquisa Agropecuária Brasileira, 1985, 20(12):1381-1387
- Culley, J. L. B. e W. E. Larson Susceptibility to compression of a clay loam haplaquol. Soil Science Soc. of Am. J., 1987, 51:562-567

- Currie, J. A. Gas diffusion through soil crumbs: The effects of compaction and wetting. Journal of Soil Science, 1984, 35:1-10
- Dexter, A. R. Advances in characterization of soil structure. Soil Tillage Research, 1988, 11:199-288
- Eck, H. V. e P. W. Unger Soil profile modification for increasing crop production. Advances in Soil Science, 1985, 1:65-100
- Ehlers, W. Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. Soil Science, 1975, 119:242-249
- El-Swaify, S. A. Changes in physical properties of soil clays due to precipitated aluminum and iron hydroxides: II. Colloidal interactions in the absence of drying. Soil Sc. Soc. of Am. Journal, 1976, 40:516-520
- Eltz, F. L. F., et al. Efeitos de sistemas de preparo de solo nas propriedades físicas e químicas de um latossolo bruno álico. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 1989, 13:259-267
- Embrapa. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de Métodos de Análise de Solos. Rio de Janeiro, 1979, não paginado
- Fernandes, J. M. et al. Manual de manejo conservacionista do solo para os estados do PR, RS, e SC. Embrapa, Passo Fundo, 1991
- Gameda, S. et al. Soil and crop response to high axle load subsoil compaction-recovery and accumulation. American Society of Agricultural Engineers, 1984, paper 84
- Gameda, S. et al. A review of subsoil compaction and crop response. International Conference on Soil Dynamics, Proceedings, Auburn, Alabama, 1985, 5:970-978
- Genuchten, M. Th. Van A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sc. Soc. of Am. Journal, 1980, 44:892-898
- Gerard, C. J. et al. Root growth in a clay soil. Soil Science, Baltimore, 1972, 114:37-

- Gerik, T. J. e J. E. Morrison Wheat performance using no-tilled with controlled Wheel traffic on a clay soil. Agronomy Journal, 1985, 77:115-118
- Godoy, H. et al. Clima do Paraná. Manual Agropecuário para o Paraná. Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, Londrina, 1976
- Graham, J. P. et al. Compaction of a silt loam by whelled agricultural vehicles. II. Effects on growth and yield of direct drilled winter wheat. Soil Tillage Research, 1986, 7:189-203
- Groenevelt, P. H. et al. Physical assesment of a soil with respect to rooting potential. Geoderma, Amsterdam, 1984, 34:101-114
- Gupta, S. C. e W. E. Larson Modeling soil mechanical behavior during tillage. In Predicting Tillage Effects on Soil Physical Properties and Processes. ASA special publication nº 44, Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1982, pp.151-178
- Gupta, S. C. et al. Compaction effects on soil structure. Advances in Agronomy, 1988, 42:311-338
- Hamblin, A. P. The effect of tillage on soil surface properties and the water balance of a xeralfic alfisol. Soil e Tillage Research, 1984, 4:543-559
- Hamlett, J. M. et al. Traffic and soil amendment effects on infiltration and compaction. Soil and Water, 1990, 33(3):821-826
- Henderson, C. W. L. Using a penetrometer to predict the effects of soil compaction on the growth and yield of wheat on uniform sandy soils. Aust. Journal Agric. Research, 1989, 40:497-508
- Hill, R. L. e M. Meza-Montalvo Long-term wheel traffic effects on soil physical properties under different tillage systems. Soil Science Society of Amerca Journal, 1990, 54:865-870
- Hillel, D. Fundamentals of soil physics. Academic Press, 1980, 13p.
- Kemper, W. D. et al. Effects of compaction on soil nutrient status. In: Compaction of Agricultural Soils. Barnes, K. K. Org. St. Joseph, ASAE, 1971, pp.178-189

- Kiehl, E. J. Porosidade. Manual de Edafologia: Relações Solo-Planta. Ed. Ceres, São Paulo, 1979, pp.96-111
- Klute, A. Tillage effects on the hydraulic properties of soil of a soil: a review. In: Predicting Tillage Effects on Soil Physical Properties and Processes. ASA, Special Publication nº 44, American Society of Agronomy, 1982, pp.151-178
- Klute, A. Water retention: laboratory methods. In: A. Klute (ed.). Methods of Soil Analysis: physical, Chemical, and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy, 1986, pp.635-686
- Kneale, W. R. Observations of the behavior of large cores of soil during drainage, and the calculation of hydraulic conductivity. Journal of Soil Science, 1985, 36:163-171
- Lal, R. Physical characteristics of soils of the tropics: determination and management. In: Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics. R. Lal e D. J. Greenland (ed.). Chichester, England, John Wiley and Sons Ltd, 1979, pp.7-44
- Larson, W. E. et al. Compression of agricultural soils from eight soil orders. Soil Sc. Soc. of Am. Journal, 1980, 44:450-457
- Lindbergh, S. e S. Petterson Effects of mechanical stress on uptake and distribution of nutrients in barley. Plant and Soil, 1985, 83:295-309
- Lowry, F. E. et al. Growth rate and yield of cotton as influenced by depth and bulk density of soil pans. Soil Science Society of Am. Proceedings, 1970, 34:306-309
- Lynch, J. M. Interactions between biological processes, cultivation and soil structure. Plant and Soil, 1984, 76:307-318
- Lynch, J. M. e E. Bragg Microorganisms and soil aggregate stability. Advances in Soil Science, 1985, 2:133-171
- Malavolta, E. et al. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1989,
- Mundstock, C. M. Cultivo de cereais de estação fria. Ed. NBS, Porto Alegre, 1983

- Nasch, V. E. e V. C. Baligar The growth of soybean (*Glicine max*) roots in relation to soil micromorfology. Plant and Soil, 1974, 41:81-89
- Nye, P. H. e P. B. Tinker Solute movement in the soil-root system. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1977
- Oades, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. Plant and Soil, 1984, 76:319-337
- Omoti, U. e A. Wild Use of fluorescent dyes to mark the pathways of solute movement through soils under leaching conditions field experiments. Soil Science, 1979, 128:98-104.
- Raij, Bernardo Van. Fertilidade do solo e adubação São Paulo, Ceres Potafós, pag. 36-37, 1991
- Roloff, G. Aspectos dinâmicos da estrutura dos solos agrícolas e seu estudo. 1986, no prelo
- Ruggiero, C. et al. Effects of diferent soil tillage methods on root density of winter wheat (*Triticum durum* desf.) in a hilly area of southern Italy. Agricultura Mediterranea, 1990, 120:19-24
- Russel, R. S. Plant root systems: their function and interation with the soil. Maidenhead, Mcgraw-Hill Book Co. Ltd, 1977
- Shenk, M. K. e S. A. Barber Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. Agronomy Journal. Madison, 1979, 71:921-924
- Schafer, R. L. e C. E. Johnson Changing soil condition the soil dynamics of tillage. In: Predicting Tillage Effects on Soil Physical Properties and Processes. ASA. Special Publication nº 44, American Society of Agronomy, 1982, pp.13-28
- Schuler, R. T. e B. Lowery Subsoil compaction effect in corn production with soil types. American Society of Agricultural Engineers, 1984, paper nº 84-1032
- Sidiras, N. e M. J. Vieira Comportamento de um latossolo roxo distrófico compactado pelas rodas do trator na semeadura. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 1984, 19:1285-1293
- Soane, B. D. . Traction and transport as related to cropping systems In: InternationalConference on Soil Dynamics, Proceedings. Auburn, Alabama, 1983, 5:863-935

- Tama, K. e S. A. El-Swaify Charge colloidal and structural stability interrelationships for oxidic soils. In: Modification of Soil Structure. W. W. Emerson; R. D. Bond e A. R. Dexter (ed.). Chichester, England, John Wiley and Sons Ltd, 1978, pp.41-49
- Taylor, J. H. Benefits of permanent traffic lanes in a controlled traffic crop production system. Soil and Tillage Research, 1983, 3:385-395
- Taylor, J. H. e W. R. Gill Soil compaction: state-of-the-art report. Journal of Terramechanics, 1984, 21:195-213
- Taylor, H. M. e L. F. Ratliff Root elongation rates of cotton and peanuts as function of soil strength and soil water content. Soil Science, 1969, 108:113-119
- Tennant, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. The Journal of Ecology, Oxford, 1975, 63:995-1001
- Tisdall, J. M. e J. M. Oades Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. Australian Journal of Soil Research, 1979, 18:423-434
- Tisdall, J. M. e J. M. Oades Organic matter and water stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, 1982, 33:141-163
- Tollner, E. W. e B. P. Verna Modified cone penetrometer for measuring soil mechanical impedance. Transactions of ASAE, St. Joseph, 1984, 27:331-336
- Tormena, Cássio Antonio Resistência à penetração e porosidade em plantio direto influenciados por preparos pré-implantação, calagem e tráfego. Dissertação para Mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Agronomia-UFPR, 1991, Curitiba-PR.
- Trouse, A. C. Jr. Root tolerance to soil impediments. In: Crop Tolerance to Subtropical Land Conditions. Madison, ASA, 1978
- Unger, P. W. et al. Alleviating plant water stress. In: Modifying the Root Environment to Reduce Water Stress. St. Joseph, ASAE, 1981, pp.21-57
- Vepraskas, M. J. et al. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distributions and effective stress. Soil Sc. Soc. of Am. Journal, 1984, 48:1220-1225

- Voorhes, W. B. et al. Compaction and soil structure modifications by wheel traffic in the northern corn belt. Soil Sc. Soc. of Am. Journal, 1978, 42:344-349
- Voorhes, W. B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. Soil Sc. Soc. of Am. Journal, 1983, 47:129-133
- Voorhes, W. B. e M. J. Lindstrom Soil compaction constraints on conservation tillage in the northern corn belt. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38:307-311
- Voorhes, W. B. et al. Effect of preplant wheel traffic on soil compaction, water use and growth of spring wheat. Soil Sc. Soc. of Am. Journal, 1985, 49:215-220
- Wiersum, L. K. The relationships of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. Plant and Soil, 1957, 9:75-85
- Wolf, D. e A. Hadas Soil compaction effects on cotton emergence. Transactions of the ASAE, 1984, 27:665-695